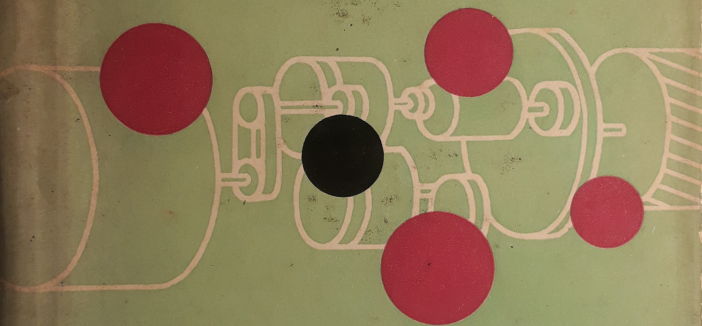


**ED BUKSTEIN**

# **SERVO MECANISMOS BASICOS**



**H.A.S.A.**

**EDITORIAL HISPANO AMERICANA S.A.**

## SERVOMECANISMOS BASICOS

por ED BUCKSTEIN

La automatización de los procesos industriales ha sido posible gracias a los servomecanismos, aparatos que pueden definirse como sistemas de control con autocorrección. Es decir que un dispositivo está encargado de regular un proceso, pero si la operación no es absolutamente correcta, es decir, si hay error, un detector de ese error se encarga de poner en marcha los correctores y el proceso se normaliza. En otras palabras, la Electrónica suministra dispositivos que permiten mejorar la industria, acelerar sus procesos, perfeccionar sus resultados.

Para ocuparse de este tema nadie mejor que Ed Buckstein, Instructor de Electrónica Avanzada en el Instituto de Electrónica y Televisión del Noroeste en los Estados Unidos de Norte América. Su obra está adaptada al nivel de los técnicos en Electrónica y comienza con los principios básicos necesarios para ocuparse después de los sistemas de control de lazo cerrado, los detectores de error, correctores de error y las técnicas de estabilización. Los elementos empleados en estas operaciones son válvulas de vacío, transistores, amplificadores magnéticos y rotativos.

La EDITORIAL HISPANO AMERICANA S. A. no podía dejar de encarar la edición de un libro de esta envergadura y por ello ve la luz la obra citada, para enriquecer el catálogo de literatura técnica en nuestro idioma. La esmerada traducción y presentación son las acostumbradas en nuestro sello editorial.

ED BUKSTEIN

# SERVOMECANISMOS BASICOS

EDITORIAL HISPANO AMERICANA S. A.

**H. A. S. A.**



# SERVOMECANISMOS BASICOS

Ed BUKSTEIN

Instructor de Electrónica avanzada  
Northwestern Television and Electronics Institute

# SERVOMECANISMOS BASICOS

Versión castellana por  
ANTONIO MAS FERNANDEZ-YAÑEZ

Master of Science. Electrical Engineer  
Stanford University, California U.S.A.



EDITORIAL HISPANO AMERICANA S.A.  
ALSINA 731 BUENOS AIRES

Título del original en inglés:

**BASIC SERVOMECHANISMS**

Copyright © by Holt, Rinehart and Winston, Inc.  
Library of Congress Catalog Card Number: 63-7771. U.S.A.

Hecho el depósito que marca la Ley 11.723

*Versión castellana por derechos adquiridos a Holt, Rinehart y Winston*

Copyright © by EDITORIAL HISPANO AMERICANA S. A.

Buenos Aires - 1967

## INDICE GENERAL

|                                                                | Pág.      |
|----------------------------------------------------------------|-----------|
| PREFACIO .....                                                 | 7         |
| <b>CAPÍTULO 1 / SISTEMAS DE CONTROL DE LAZO CERRADO .....</b>  | <b>9</b>  |
| 1-1. Introducción .....                                        | 9         |
| 1-2. Sistemas de control de lazo abierto .....                 | 9         |
| 1-3. Sistemas de control de lazo cerrado .....                 | 10        |
| 1-4. Principios de servomecanismos .....                       | 11        |
| 1-5. Componentes de servomecanismos .....                      | 14        |
| SUMARIO .....                                                  | 19        |
| PREGUNTAS .....                                                | 20        |
| <b>CAPÍTULO 2 / DETECTORES DEL ERROR: POTENCIOMETROS .....</b> | <b>21</b> |
| 2-1. Potenciómetro en puente de c.c. ....                      | 21        |
| 2-2. Potenciómetro en puente de c.a. ....                      | 24        |
| 2-3. Resolución .....                                          | 27        |
| 2-4. Linealidad .....                                          | 29        |
| 2-5. Conformidad .....                                         | 34        |
| 2-6. Construcción de potenciómetros .....                      | 38        |
| SUMARIO .....                                                  | 43        |
| PREGUNTAS .....                                                | 44        |
| <b>CAPÍTULO 3 / DETECTORES DEL ERROR: TRANSDUCTORES .....</b>  | <b>45</b> |
| 3-1. Introducción .....                                        | 45        |
| 3-2. Transductores sensibles a la posición .....               | 47        |
| 3-3. Transductores de temperatura .....                        | 52        |
| 3-4. Transductores de presión .....                            | 53        |
| 3-5. Flujo, deformación y humedad .....                        | 55        |
| SUMARIO .....                                                  | 56        |
| PREGUNTAS .....                                                | 57        |
| <b>CAPÍTULO 4 / DETECTORES DEL ERROR: SINCRONOS .....</b>      | <b>58</b> |
| 4-1. Introducción .....                                        | 58        |
| 4-2. El Sincrotransmisor .....                                 | 58        |
| 4-3. El Sincrorreceptor .....                                  | 63        |
| 4-4. El Sincrotransformador de control .....                   | 66        |
| 4-5. El Sincrodiferencial .....                                | 71        |
| 4-6. Símbolos y dimensiones de los síncronos .....             | 75        |
| SUMARIO .....                                                  | 77        |
| PREGUNTAS .....                                                | 77        |
| <b>CAPÍTULO 5 / CORRECTORES DEL ERROR .....</b>                | <b>79</b> |
| 5-1. Introducción .....                                        | 79        |
| 5-2. Servomotores de c.c. ....                                 | 79        |
| 5-3. Servomotores de c.a. ....                                 | 83        |
| 5-4. Motores incrementales .....                               | 90        |
| SUMARIO .....                                                  | 90        |
| PREGUNTAS .....                                                | 91        |



|                                                                              | Pág. |
|------------------------------------------------------------------------------|------|
| <b>CAPÍTULO 6 / AMPLIFICADORES DEL ERROR: VALVULAS ELECTRONICAS DE VACIO</b> | 92   |
| 6-1. Introducción                                                            | 92   |
| 6-2. Amplificadores de c.c.                                                  | 92   |
| 6-3. Amplificadores con vibrador                                             | 94   |
| 6-4. Amplificadores de c.a.                                                  | 103  |
| SUMARIO                                                                      | 105  |
| PREGUNTAS                                                                    | 105  |
| <b>CAPÍTULO 7 / AMPLIFICADORES DEL ERROR: EL TRANSISTOR</b>                  | 107  |
| 7-1. El transistor: fundamentos                                              | 107  |
| 7-2. Amplificadores transistorizados                                         | 110  |
| 7-3. Servoamplificadores                                                     | 115  |
| SUMARIO                                                                      | 120  |
| PREGUNTAS                                                                    | 120  |
| <b>CAPÍTULO 8 / AMPLIFICADORES DEL ERROR: MAGNETICOS</b>                     | 122  |
| 8-1. Introducción                                                            | 122  |
| 8-2. El reactor saturable                                                    | 122  |
| 8-3. Amplificadores magnéticos                                               | 124  |
| 8-4. Servoamplificadores                                                     | 130  |
| SUMARIO                                                                      | 136  |
| PREGUNTAS                                                                    | 136  |
| <b>CAPÍTULO 9 / AMPLIFICADORES DEL ERROR: ROTATIVOS</b>                      | 138  |
| 9-1. Sistema Ward Leonard                                                    | 138  |
| 9-2. Servomecanismos de velocidad                                            | 141  |
| 9-3. La amplidina                                                            | 144  |
| SUMARIO                                                                      | 147  |
| PREGUNTAS                                                                    | 147  |
| <b>CAPÍTULO 10 / ESTABILIDAD DE LOS SERVOMECHANISMOS</b>                     | 149  |
| 10-1. Introducción                                                           | 149  |
| 10-2. Amortiguamiento                                                        | 150  |
| 10-3. Control por variación de la salida                                     | 153  |
| 10-4. Control por variación del error                                        | 156  |
| 10-5. Control integral                                                       | 159  |
| SUMARIO                                                                      | 161  |
| PREGUNTAS                                                                    | 162  |
| <b>CAPÍTULO 11 / APLICACIONES</b>                                            | 163  |
| 11-1. Introducción                                                           | 163  |
| 11-2. Registro de presión                                                    | 166  |
| 11-3. Medida de pesos                                                        | 167  |
| 11-4. Voltímetro tipo servo                                                  | 168  |
| 11-5. Servo con acoplamiento magnético                                       | 169  |
| 11-6. Radiogoniómetro                                                        | 173  |
| 11-7. Control automático de vuelo                                            | 174  |
| 11-8. Control neumático e hidráulico                                         | 177  |
| 11-9. Control de empuje para cohetes                                         | 180  |
| 11-10. Servo computadores                                                    | 180  |
| SUMARIO                                                                      | 182  |
| PREGUNTAS                                                                    | 183  |

## PREFACIO

*Un servomecanismo es un sistema de control con autocorrección. Un dispositivo detector de error compara la salida del sistema con una entrada de referencia y determina si la salida tiene o no el valor deseado. En este último caso, el detector de error produce una señal que es amplificada y aplicada a un dispositivo corrector del error. Este corrector restaura la salida al valor deseado. Esta técnica de control automático no es nueva, pero ha sido objeto de mayor atención en los últimos años como consecuencia de su empleo más frecuente en aparatos industriales y militares. En la industria, los servomecanismos han acelerado el camino hacia la automatización incrementando la producción y reduciendo el costo de la misma. En las aplicaciones militares, los servomecanismos constituyen las piezas básicas de los sistemas automáticos de control de vuelo y de los sistemas de dirección de proyectiles.*

*Servomecanismos básicos está redactado al nivel del técnico en Electrónica. Se hacen resaltar especialmente los principios de funcionamiento más que los procedimientos y factores de diseño. El capítulo 1 es una introducción al tema y trata de los conceptos básicos de un sistema de control de lazo cerrado. Este capítulo establece los puntos de referencia para el resto del libro. Los capítulos 2, 3 y 4 están dedicados a los dispositivos detectores de error: potenciómetros, transductores y síncronos respectivamente. El capítulo 5 trata de los correctores de error. Las válvulas de vacío, transistores, amplificadores magnéticos y amplificadores rotativos, todos ellos extensamente empleados en los equipos de servomecanismos, son tratados en los capítulos 6, 7, 8 y 9. En el capítulo 10 se analizan las técnicas de estabilización, y las aplicaciones prácticas de los servomecanismos se describen en el capítulo 11.*

ED BUKSTEIN

Minneapolis, Minn.

Septiembre 1962

## CAPITULO 1

### SISTEMAS DE CONTROL DE LAZO CERRADO

#### 1 - 1. Introducción

El control automático tiene un extenso empleo en aplicaciones industriales, comerciales y militares. El control varía ampliamente en cuanto a diseño del circuito y grado de complejidad según la exactitud, estabilidad y velocidad de respuesta que se requiera en cada caso. Por ejemplo, un control automático de temperatura puede ser relativamente sencillo en cuanto a diseño, mientras que un sistema de control de vuelo de un avión o de un proyectil puede ser extremadamente complejo.

Un sistema de control automático de gran importancia, conocido como *sistema de control por realimentación*, emplea la realimentación para comparar la magnitud que se controla con un valor de referencia. Esta comparación determina si la magnitud que se controla (temperatura, presión, flujo de un líquido, posición mecánica u otra cualquiera) tiene o no el valor deseado. En el caso que la magnitud controlada tenga un valor distinto del deseado, el dispositivo de comparación proporciona una *señal de error*. Esta señal de error es amplificada y se emplea para restaurar la magnitud controlada al valor necesario. De esta forma, el sistema trata de reducir a cero la señal del error, con lo cual la magnitud o variable controlada quedará en el valor que se desea tener.

Un *servomecanismo* es un sistema de control con realimentación en el cual la magnitud controlada es una *posición mecánica* (aunque el término servomecanismo se utiliza corrientemente para describir cualquier sistema de control con realimentación). Los servomecanismos de control de posición se emplean normalmente para aplicaciones tales como el gobierno del timón de un barco, el movimiento de los alerones y otros planos de control de vuelo de un avión, el control de posición de una válvula en una tubería de combustible, el movimiento o seguimiento automático de una antena de radar, y otras muchas.

#### 1 - 2. Sistema de control de lazo abierto

En un sistema de control de lazo abierto, la salida (presión, velocidad de un motor, temperatura, etc.) puede ajustarse a un valor deseado, pero no

existe compensación automática para corregir su magnitud cuando se separa de ese valor deseado. Como ejemplo de un sistema de control de lazo abierto consideremos el circuito de control de un motor que emplea una resistencia variable en serie con la armadura. Por medio de esta resistencia, la corriente en la armadura puede ajustarse para que el motor gire a un determinado número de revoluciones por minuto. No obstante, ajustando la resistencia al valor de ohm necesario, no se tiene la seguridad de que el motor continuará girando al número de revoluciones por minuto deseado. El motor puede acelerar o frenar su velocidad como consecuencia de las variaciones de la tensión de alimentación o de las variaciones de la carga aplicada a su eje. Estos cambios no iniciarán ninguna acción de corrección automática para mantener al motor en la velocidad deseada. No existe realimentación por medio de la cual pueda compararse la salida (velocidad) con una magnitud de referencia. La resistencia variable controla la velocidad del motor, pero el motor no puede controlar la posición de la resistencia.

### 1 - 3. Sistema de control de lazo cerrado

El sencillo control de velocidad de un motor descrito anteriormente puede convertirse en un sistema de lazo cerrado modificándolo de tal forma que las variaciones de velocidad del motor modifiquen la posición del contacto de la resistencia variable. En estas condiciones, cualquier cambio de la velo-

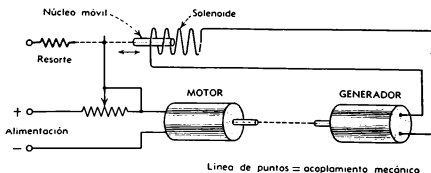


FIG. 1-1. Control de lazo cerrado

cidad del motor producirá una variación de tensión de entrada en su armadura restaurando al motor la velocidad establecida. En la figura 1-1 se ilustra una forma de conseguir este resultado. Un pequeño generador de corriente continua está acoplado mecánicamente al eje del motor, de tal forma que la tensión de salida de este generador es proporcional a la velocidad del motor: el generador produce menos tensión cuando el motor se frena, y más tensión cuando el motor acelera. La tensión de salida del generador se aplica a un solenoide cuyo núcleo de hierro móvil se acopla mecánicamente al cursor de la resistencia

variable. Un resorte tiende a desplazar el cursor en un sentido y el solenoide lo desplaza en el sentido contrario. De esta forma, el cursor se desplaza hasta una posición en la cual la tensión del resorte está compensada exactamente por la fuerza del solenoide. En estas condiciones, si el motor tiende a acelerar, el generador aplicará más tensión al solenoide. El núcleo de hierro se introducirá más en la bobina y el cursor de la resistencia variable se desplazará hasta que la tensión del resorte haya aumentado lo suficiente como para compensar la nueva fuerza de tracción del solenoide. Este movimiento del cursor aumentará el valor de la resistencia en serie con la armadura del motor. Como consecuencia de todo este proceso, el motor frenará su velocidad restaurándola al valor original. Si la velocidad del motor tendiese a disminuir por debajo del valor deseado, se aplicaría menos tensión al solenoide. El cursor de la resistencia variable se movería en dirección contraria, originando un aumento de corriente en la armadura del motor que aumentaría su velocidad hasta alcanzar el valor deseado.

El sistema de control que se ilustra en la figura 1-1 tiene algunas desventajas que limitan su funcionamiento. Pueden obtenerse mejores características de funcionamiento empleando un generador para alimentar la polarización de un tiratrón rectificador que alimente la armadura del motor. No obstante, la figura 1-1 muestra los requerimientos de un sistema de control de lazo cerrado: la variación de la salida (velocidad del motor) origina una variación de la entrada (excitación de la armadura), restaurando la salida al valor original.

#### 1-4. Principios de servomecanismos

Un servomecanismo es un sistema de control de lazo cerrado en el cual la salida (cantidad controlada) es una posición mecánica. La evolución de un servomecanismo se ilustra en la figura 1-1. En este caso, la cantidad que se controla a la salida es la posición de una antena. Cerrando el interruptor del circuito que se muestra en la figura 1-2 (A), un operador puede hacer girar la antena. Cuando la antena ha alcanzado la posición deseada, el operador abre el circuito para parar el motor. Este sistema de control simple tiene muchas desventajas:

1. El operador no puede abrir el interruptor con suficiente rapidez y la antena se moverá sobrepasando la posición deseada (sobreimpulso).

2. El motor no es reversible en sentido de giro. Si la antena sobrepasa la posición deseada, deberá girar "una vuelta completa" para alcanzar de nuevo la posición correcta.

3. La antena puede estar situada fuera de la vista del operador (al exterior o en el tejado de un edificio, por ejemplo). Si no se dispone de un indicador de posición de la antena, el operador deberá "estimar" la posición de la misma. Conociendo la velocidad del motor y la relación de reducción de la caja de engranajes, el operador deberá cerrar el interruptor durante el tiempo que se requiere para llevar la antena a la posición deseada. Este

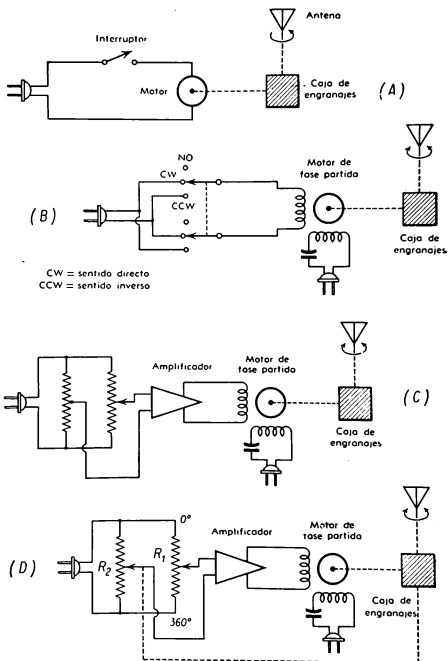


FIG. 1-2. Servomecanismo

tiempo depende de la velocidad del motor, pero la velocidad del motor puede variar debido a las variaciones de la tensión de alimentación. Un sistema de este tipo que funciona *por estima* es de muy poca exactitud. Los errores humanos por parte del operador también contribuyen a la falta total de precisión. Otra desventaja de este sistema es que el operador ha de conocer la "última" posición de la antena para poderla llevar a una nueva posición. Todos estos errores se acumulan de tal forma, que después de varios cambios de posición el error total puede ser considerable.

La figura 1-2 (B) muestra una versión mejorada del circuito de la figura 1-2 (A). En este caso se emplea un motor reversible, y de esta forma, en el caso que la antena sobrepase la posición deseada, el operador puede "volverla atrás" a la posición correcta. Una fase del motor está conectada a la línea de alimentación a través de un capacitor cambiador de fase y el otro campo del motor está conectado a través de un interruptor de dos polos y tres posiciones. Por medio de este interruptor, el operador puede invertir la fase de la tensión aplicada a uno de los campos del motor, haciendo que éste invierta su sentido de giro. Excepto la reversibilidad del motor, el circuito tiene las mismas limitaciones que el de la figura 1-2 (A).

Los circuitos de las figuras 1-2 (A) y 1-2 (B) son circuitos del tipo *todo o nada*: el motor está en marcha o parado y no está prevista la variación de la velocidad de giro. La figura 1-2 (C) muestra una nueva mejora, pues permite el control de velocidad además del de giro. Los dos divisores de tensión, uno con toma fija y el otro con toma variable, forman un circuito puente. Cuando el cursor está en una posición que corresponde a la toma fija (centro de la resistencia), el puente está equilibrado y no hay entrada al amplificador. En estas condiciones el amplificador no proporciona salida y el motor no gira. Si se desplaza el cursor de la posición central, el puente se desequilibra y aplicará una entrada al amplificador. Como en este caso el amplificador proporciona salida, el motor se pondrá en marcha. El sentido de giro del motor viene determinado por la dirección en que se haya desplazado el cursor a partir de la posición central. Moviendo el cursor hacia la parte alta, el desequilibrio del puente será en un sentido, y moviéndolo hacia abajo el desequilibrio será en sentido contrario. El desplazamiento del cursor a uno u otro lado del centro invierte la fase de la señal de entrada del amplificador. La señal de salida del amplificador invierte asimismo la fase, cambiando el sentido de giro del motor.

La velocidad de giro del motor está determinada por la cantidad que ha sido desplazado el cursor de la posición central. Si el cursor ha sido desplazado ligeramente del centro, el desequilibrio del puente será muy pequeño. El amplificador recibirá una señal de entrada de pequeña amplitud y el motor girará lentamente. Si el cursor se separa más del centro, el puente sufrirá un desequilibrio mayor. Cuanto mayor sea la amplitud de la señal de entrada del amplificador el motor girará más rápidamente.

Con el circuito dispuesto como se muestra en la figura 1-2 (C) el operador puede detener el motor lentamente cuando la antena se aproxima a la posición

deseada. Esta situación ayuda a evitar el sobreimpulso, pero el control continúa siendo del tipo de "estima". Los circuitos de las figuras 1-2 (A), 1-2 (B) y 1-2 (C) pertenecen a la variedad de lazo abierto: no proporcionan una corrección automática para restaurar la salida (posición de la antena) cuando se desvía del valor deseado.

En la figura 1-2 (D) se muestra una nueva mejora. En este caso el motor está acoplado mecánicamente al eje de uno de los potenciómetros. En la práctica, este potenciómetro debe montarse próximo al motor o a la estructura de la antena para simplificar la conexión mecánica. Como el circuito puente puede controlar al motor y a su vez el motor controla al circuito puente, este sistema de autocorrección pertenece al tipo de lazo cerrado.

Si la antena, en la figura 1-2 (D), no está en la posición deseada, el puente está desequilibrado y el motor gira. Cuando el motor gira lo hace también la antena y al mismo tiempo el eje del potenciómetro al cual está mecánicamente acoplada. El giro del motor continúa hasta que el puente ha sido restaurado a la posición de equilibrio. En este momento el motor se detiene y la antena queda en la posición deseada. El circuito es por tanto *autoestabilizado* o *buscador de nulo*. Cada vez que el operador mueve el cursor del potenciómetro  $R_1$ , el motor gira y mueve el eje de  $R_2$  (así como la antena). De esta forma, el cursor de  $R_2$  sigue automáticamente el movimiento del cursor de  $R_1$ . El potenciómetro  $R_1$  puede tener una escala graduada de 0 a  $360^\circ$  para indicar la demora (azimut) de la antena. La antena girará automáticamente hacia la dirección señalada por el índice de esta escala. Como este sistema de control es de lazo cerrado y como la cantidad controlada es una posición mecánica, constituye un *verdadero* servomecanismo.

Una característica importante del circuito que se muestra en la figura 1-2 (D) es que el motor se detiene lentamente cuando la antena se aproxima a la posición deseada (debido a que el puente se aproxima a la posición de equilibrio y proporciona menor entrada al amplificador). La magnitud de la corrección es, en este caso, proporcional a la magnitud del error. Este control proporcional ayuda a reducir el sobreimpulso.

### 1 - 5. Componentes de los servomecanismos

En la figura 1-3 se representa un diagrama generalizado en bloques de un servomecanismo. Como se indica en la figura, el servomecanismo completo está formado por tres componentes básicos: un detector del error, un amplificador y un corrector del error. El detector del error es un dispositivo que compara la salida con la referencia de entrada. En el caso que la salida no tenga el valor deseado (representado por la entrada de referencia) el detector del error proporciona la señal del error. Esta señal del error se amplifica y se aplica al corrector del error. El corrector del error, a su vez, proporciona la fuerza necesaria para restaurar la salida al valor deseado. Cuando esto ha sido realizado, la realimentación (representada por la salida) es igual a la referencia de entrada (que representará el valor deseado de la salida). En estas



condiciones, el detector del error no proporciona salida y el corrector del error está *en reposo*. En cierto sentido, el detector del error es el "cerebro" del

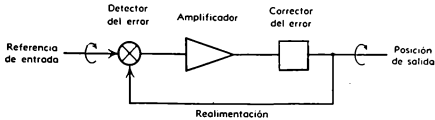


FIG. 1-3. Diagrama en bloques de un servomecanismo

sistema y determina cuándo es necesaria la corrección. El corrector del error es el "músculo" que proporciona la fuerza necesaria para corregir la salida.

#### Detectores del error

En el circuito representado en la figura 1-2 (D) los dos potenciómetros del circuito puente constituyen el detector del error. La posición del cursor de  $R_1$  es la referencia de entrada y representa la posición deseada de la salida (antena). El acoplamiento mecánico con  $R_2$  constituye la realimentación y representa la posición real de la salida. En el momento en que la posición de la salida difiera de la posición deseada, los puntos de contacto de los cursores  $R_1$  y  $R_2$  estarán a un potencial diferente. Esta diferencia de potencial es la señal del error que se aplica al amplificador. En la figura 1-2 (D), el motor actúa como corrector del error y proporciona la fuerza necesaria para mover la salida a la posición deseada (simultáneamente restaura el puente a la posición de equilibrio).

Existen muy diversos tipos de detectores del error y se seleccionan de acuerdo con las necesidades particulares en cada aplicación. En los capítulos 2, 3 y 4 se hace una descripción detallada de los mismos. En las figuras 1-4 y 1-5 se representan dos unidades típicas.

El transformador  $E$ , que se representa en la figura 1-4, es un tipo especial de transformador diferencial. La parte en  $E$  del núcleo del transformador tiene un bobinado primario en la parte central y dos bobinados secundarios idénticos en las partes laterales. Los dos secundarios están conectados en serie y en oposición, de forma que sus tensiones se anulan. Cuando la armadura está exactamente centrada sobre la sección  $E$ , aparece la misma tensión inducida en los dos secundarios. En estas condiciones las tensiones de los secundarios se anulan y no aparece señal del error a la salida. Por el contrario, si la armadura no está centrada sobre la sección  $E$ , el acoplamiento de un secundario será mayor que el del otro. En uno de los secundarios se inducirá mayor tensión que en el otro. Como los dos secundarios no tienen igual tensión, la diferencia aparecerá a la salida como señal del error. La magnitud

de esta tensión de error será proporcional al apartamiento que la armadura ha sufrido de su posición central. La fase de la tensión del error estará determinada por la dirección en que la armadura ha sido separada de su posición central.

En la práctica, el transformador *E* se monta de forma que el núcleo y la armadura puedan moverse. La armadura se acopla mecánicamente a la carga para representar el valor real de la salida. La sección móvil en *E*, representa la referencia de entrada y puede moverse para representar la

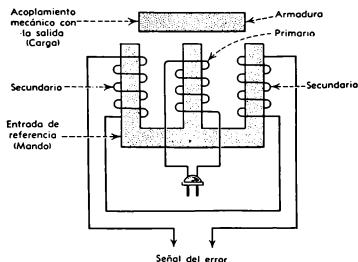


FIG. 1-4. Transformador en "E"

posición deseada de la carga. En el momento en que la posición real de la carga difiere de la posición deseada, la armadura no está centrada sobre la sección *E*. La señal del error resultante es amplificada y se emplea para mover la carga a la posición deseada. Este movimiento está mecánicamente acoplado a la armadura. Cuando la armadura alcanza de nuevo la posición central, la señal del error es cero y la carga interrumpe su movimiento.

En la figura 1-5 se representa un detector del error por medio de *síncronos*<sup>1</sup>. El síncrono, cuya apariencia es la de un pequeño motor, contiene un rotor con un bobinado y un estator con tres bobinados conectados en *Y*. El rotor del sincrotransmisor se conecta a una línea de alimentación de c.a. y funciona como un bobinado primario. Los bobinados del estator actúan como secundarios y en ellos aparece una tensión inducida. El valor de la tensión inducida en cada arrollamiento del estator depende de la posición

<sup>1</sup> El síncrono se conoce también con el nombre de *selsyn* (nombre comercial de General Electric Co.).

relativa del bobinado del rotor respecto al estator. Como la posición del rotor puede variarse haciendo girar el eje del síncrono, la tensión del bobinado del estator puede también variarse. Para cualquier posición del eje del rotor, existen unas tensiones inducidas determinadas en los arrollamientos del estator. En el sincrotransmisor de control, los bobinados del estator actúan como primario y los del rotor como secundario. El valor de la tensión inducida en el rotor depende de la posición física de éste con respecto al bobinado del estator.

Como se muestra en la figura 1-5, la posición del eje (rotor) del sincrotransmisor representa la entrada de referencia. El eje del transformador de

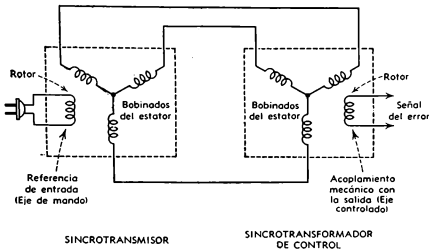


FIG. 1-5. Síncronos

control representa la salida. Como las tensiones del secundario (estator) del transmisor se aplican al primario (estator) del transformador de control, el valor de la tensión inducida en el rotor del transformador de control depende de la posición del rotor del transmisor. La tensión inducida en el rotor del transformador de control es la señal del error, y el valor de esta tensión depende de la diferencia angular entre los dos rotores. Esta tensión del error es amplificada y aplicada al motor. El motor mueve la carga (salida) y a su vez el eje del transformador de control. Cuando el rotor de éste alcanza la posición correspondiente al rotor del transmisor, la señal del error se anula. En este momento el motor se detiene y la carga se encuentra en la posición deseada. El eje de entrada se conoce con el nombre de *eje de mando* y puede fijarse su posición mediante una esfera graduada, representando así la posición de la carga. Cada vez que se mueve el eje de mando la carga cambiará de posición de acuerdo con él.

*Servoamplificadores*

El amplificador de un servomecanismo debe tener suficiente sensibilidad para responder a la señal de bajo nivel procedente del detector del error y proporcionar potencia suficiente a su salida para gobernar al corrector del error. En la práctica se emplean normalmente válvulas de vacío, transistores y amplificadores magnéticos. La característica total de funcionamiento del servomecanismo depende de la característica del servoamplificador, especialmente de la ganancia y la respuesta de frecuencia del amplificador. Algunos detectores del error proporcionan señales del error en c.c. y otros en c.a.; por tanto, el amplificador ha de ser del tipo conveniente a la señal producida

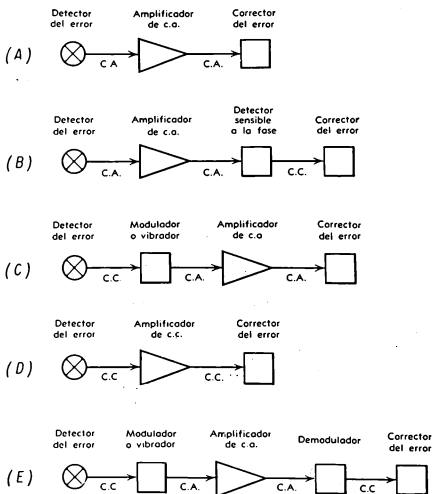


FIG. 1-6. Distintos tipos de servomecanismos

por el detector del error con el cual va a emplearse. En resumen, el corrector del error requerirá una entrada en c.a. o en c.c. según el diseño.

La figura 1-6 (A) muestra un detector del error que produce una señal en c.a. y un corrector del error que requiere una entrada en c.a. Por tanto, se emplea un amplificador de c.a. (*R-C* o acoplado por transformador). En la figura 1-6 (B) la señal del error es de c.a., pero el detector del error necesita una entrada en c.c. La salida del amplificador tiene que pasar por un detector sensible a la fase que convierte la señal de c.a. en una tensión continua cuya polaridad está determinada por la fase de la corriente alterna. En la figura 1-6 (C), la señal del error es corriente continua pero el corrector del error requiere una entrada en c.a. Es necesario emplear un modulador o un vibrador para convertir la señal del error continua en una corriente alterna. Cuando la señal del error es de c.c. y el corrector del error también requiere una entrada de c.c., es necesario emplear un amplificador de c.c. (acoplamiento directo), como se indica en la figura 1-6 (D). Como los amplificadores de c.c. presentan ciertas dificultades de diseño, los amplificadores de c.a. son preferidos por los diseñadores. La disposición indicada en la figura 1-6 (E) se emplea con gran preferencia a la representada en la figura 1-6 (D). El modulador o vibrador convierte la señal del error de c.c. en una corriente alterna, lo cual permite el empleo de un amplificador de c.a. La señal de salida del amplificador se detecta para proporcionar la entrada en c.c. requerida por el corrector del error.

### *Correctores del error*

El corrector del error de un servomecanismo debe proporcionar la fuerza mecánica para poner la carga en posición. Como correctores del error se emplean frecuentemente motores eléctricos (tanto de c.a. como de c.c.), los solenoides y válvulas controladas eléctricamente. Además de proporcionar la fuerza mecánica necesaria, el corrector del error ha de ser capaz de tener una velocidad de respuesta suficiente para satisfacer las necesidades del dispositivo a que se aplique. En unión con el corrector del error se emplean a menudo trenes de engranajes, levas y otros sistemas de acoplamiento mecánico. Por medio de estos dispositivos mecánicos se efectúan la transmisión y el movimiento necesario para situar la carga en posición y reestablecer el equilibrio del circuito a la condición de señal del error nula.

### SUMARIO

En contraste con el sistema de control de lazo abierto, el sistema de lazo cerrado tiene autocorrección. Cuando la salida de un sistema de lazo cerrado se aparta del valor deseado, el circuito responde a este cambio y restaura la salida al valor correcto. Esta autorrestauración de la salida se lleva a cabo por medio de la realimentación (tanto mecánica como eléctrica o ambas a la vez). La realimentación representa el valor real de la salida y se compara con la

referencia de entrada que representa el valor deseado de la salida. Como consecuencia de esta comparación el detector del error proporciona una señal de salida que representa la diferencia entre el valor real y el deseado de la salida. Esta señal del error se amplifica y se aplica a un corrector del error. Cuando el corrector del error restaura la salida al valor deseado, la señal del error se reduce a cero y la acción correctiva termina.

El servomecanismo es un sistema de control con realimentación de lazo cerrado en el cual la salida controlada es una posición mecánica. Entre sus aplicaciones típicas se incluyen la orientación de antenas de radar y el control de planos de dirección de aviones y proyectiles.

De acuerdo con su diseño, el detector del error puede producir una salida en c.a. o en c.c. El servoamplificador ha de ser diseñado de acuerdo con ello y ha de proporcionar una salida en c.a. o en c.c. según el requerimiento del corrector del error.

#### PREGUNTAS

1. Explicar las diferencias entre los sistemas de control de lazo abierto y lazo cerrado.
2. ¿Cuál es el objeto de la *referencia de entrada* en un sistema de control con realimentación?
3. ¿La señal del error es la *entrada* o la *salida* del detector del error?
4. ¿Cuáles son las dos cantidades que se comparan en un detector del error?
5. Hacer un esquema de un transformador *E* y explicar su funcionamiento.
6. ¿Cuándo se emplea un vibrador en un servomecanismo?
7. ¿Cuándo se emplea un demodulador en un servomecanismo?
8. ¿Qué se entiende por *sobreimpulso*?

## CAPITULO 2

### DETECTORES DEL ERROR: POTENCIOMETROS

#### 2 - 1. Potenciómetro en puente de c.c.

El detector del error de un servomecanismo proporciona una señal del error cuando existe diferencia entre el valor real de la salida y un determinado valor deseado. En algunos diseños de servomecanismos, la magnitud de la señal del error es proporcional a la diferencia entre el valor real y el deseado de salida. En otros diseños, la señal del error es proporcional a la variación con que la salida se aparta del valor deseado. En otros, finalmente, la señal del error se produce solamente cuando la salida se ha desviado una cantidad predeterminada. Sin embargo, en todos estos tipos la función básica del detector del error es la misma: proporcionar una señal de error que iniciará la acción correctiva del sistema.

El potenciómetro se emplea extensamente como dispositivo detector del error. Conectado como circuito puente (fig. 2-1), un par de potenciómetros proporcionará una tensión de error cuya magnitud depende de la diferencia de posición de los dos cursores. Si el cursor del potenciómetro de la derecha está situado más cerca del terminal positivo de la fuente de alimentación que el cursor del potenciómetro de la izquierda, la tensión de error será de polaridad positiva respecto a tierra. La magnitud de esta tensión de error positiva depende del valor de la diferencia de posiciones de los dos cursores; cuanto mayor sea esta diferencia tanto mayor será la tensión de error. En la figura 2-1 (A) se indican valores numéricos. En este caso se supone que: (1) la fuente de alimentación es de 100 volt; (2) los dos potenciómetros son lineales, y (3) el amplificador, al cual se aplica la tensión de error, representa una carga insignificante para el circuito puente. Si el cursor del potenciómetro de la izquierda se sitúa a un cuarto de su recorrido hacia la parte alta de la resistencia, tendrá un potencial de 25 volt con respecto al terminal negativo de la fuente de alimentación. Si el cursor del potenciómetro de la derecha se sitúa a las tres cuartas partes de su recorrido, hacia la parte alta de la resistencia, tendrá un potencial de 75 volt con respecto al terminal negativo de la fuente de alimentación. En estas condiciones, la diferencia de potencial entre los dos cursores será de 50 volt, siendo el cursor de la derecha positivo respecto al de la izquierda. Como el cursor de la izquierda está

conectado a tierra, aparecerá una tensión de error positiva de 50 v. en los terminales de salida del puente.

Es importante tener en cuenta que la magnitud de la tensión del error está determinada por la *diferencia* de posición de los cursores y no por sus

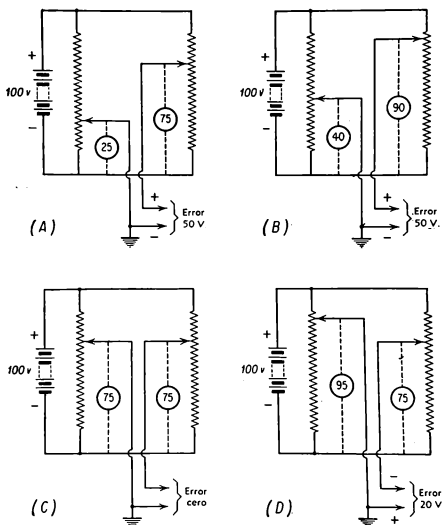


FIG. 2-1. El puente de c.c.

posiciones absolutas. En la figura 2-1 (B), por ejemplo, el error vale también 50 v. con respecto a tierra. En este caso, el cursor de la izquierda está situado en los cuatro décimos de su carrera ascendente en el elemento resistivo



y el cursor de la derecha se encuentra a los nueve décimos de su carrera. Aunque la posición absoluta de los cursores es distinta de la que aparece en la figura 2-1 (A), la diferencia de posición es la misma en ambos casos.

Si el cursor de la izquierda de la figura 2-1 (A) se desplaza gradualmente hacia arriba, la tensión positiva del error decrecerá gradualmente en amplitud. Cuando el cursor de la izquierda haya alcanzado una posición equivalente al de la derecha, como se muestra en la figura 2-1 (C), la tensión del error será cero; es decir, no existirá diferencia de potencial entre los dos cursores. Si el

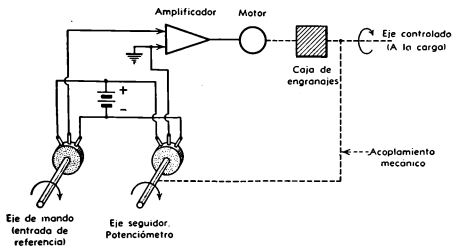


FIG. 2-2. Servomecanismo empleando puente c.c.

cursor de la izquierda se desplaza más aún en la dirección ascendente, aparecerá de nuevo una tensión del error en los terminales del puente. Como en este caso el cursor de la derecha está más próximo al terminal negativo de la fuente de alimentación que el cursor de la izquierda, la tensión del error tendrá una polaridad negativa. Esta condición se ilustra en la figura 2-1 (D).

Para mayor claridad, los cursores de la izquierda de la figura 2-1 están conectados a tierra. En la práctica, este punto puede estar sin conectar a tierra; no obstante, los potenciales relativos y las polaridades seguirán siendo los mismos.

En la figura 2-2 se muestra un servomecanismo que utiliza un potenciómetro en puente de c.c. La tensión del error que se aplica al amplificador tiene una magnitud y una polaridad determinadas por las posiciones relativas del eje de mando y del eje seguidor. Según que la tensión del error sea positiva o negativa, el motor girará en uno u otro sentido. La conexión mecánica con el eje seguidor está hecha de tal forma que su giro reduce la magnitud de la tensión de error. Cuando el eje seguidor ha alcanzado una posición angular que corresponde con la del eje de mando, la tensión del error será cero y el motor se detendrá. Como la respuesta en función del

tiempo de este circuito puede hacerse relativamente corta, el eje seguidor seguirá casi instantáneamente cualquier movimiento del eje de mando.

El eje de salida (controlado) de la figura 2-2 puede conectarse para colocar en posición a la carga y, asimismo, puede disponerse una escala graduada en el eje de mando. De esta forma, la carga se situará automáticamente en la posición que señale la escala graduada. La carga se mantendrá en esta posición como consecuencia de que cualquier desviación producirá una tensión de error que iniciará una acción correctiva. Este tipo de control de posición a distancia se emplea para el control de antenas de radar, proyectores, etc.

## 2 - 2. Potenciómetro en puente de c.a.

En las figuras 2-1 y 2-2 se muestra el puente excitado con una fuente de tensión continua, y la salida del puente (error) es por tanto un potencial continuo. Para poder amplificar esta tensión de error es necesario un amplificador de c.c. (acoplamiento directo). También podría emplearse un vibrador para convertir la tensión de error continua en una tensión alterna. En estas condiciones se podría emplear un amplificador de c.a. ( $R-C$  o acoplado por transformador). Normalmente es preferible esta última forma, aunque ello requiera el uso de un circuito con vibrador, porque los amplificadores de c.c. son muy inestables debido a las variaciones de la tensión de alimentación y a la temperatura.

En la figura 2-3 se emplea una excitación de c.a. para el puente. Esto permite el uso de un amplificador de c.a. y elimina el empleo del vibrador. Si los potenciómetros son bobinados, como suele ocurrir en la práctica, presentarán una componente inductiva, además de la resistiva, a la frecuencia de excitación. Esta componente inductiva, cuando es apreciable, afectará a la precisión del servomecanismo en que se emplee este tipo de puente. Como la frecuencia de excitación es generalmente baja (de 60 a 1.000 c/s.), la reactancia inductiva del potenciómetro es relativamente pequeña. En la práctica se emplean frecuentemente puentes excitados con c.a.

Con una excitación senoidal, como se muestra en la figura 2-3, el puente produce una tensión de error senoidal de la misma frecuencia que la fuente de excitación. La amplitud de esta señal de error senoidal depende de la diferencia de posición de los dos cursores y la fase de la tensión queda determinada por la posición relativa de los mismos. La señal del error estará *en fase o 180 grados fuera de fase* con respecto a la excitación según la dirección en que haya sido desequilibrado el puente.

La figura 2-3 (A) muestra las polaridades relativas entre la salida y la entrada del puente en un instante ( $t$ ) durante el semiciclo positivo de la entrada. Como el cursor de la derecha está más cercano al extremo positivo de la línea de alimentación en el instante  $t$ , el terminal no conectado a tierra también es positivo. Durante el semiciclo positivo de la señal de entrada se produce un semiciclo positivo de señal de error; es decir, la señal de error está

en fase con la excitación. Si el cursor de la derecha se coloca más cerca del extremo opuesto de la línea, como se muestra en la figura 2-3 (B), el terminal no conectado a tierra será negativo en el instante  $t$ . Como durante el semiciclo positivo de la excitación aparecerá una señal de error negativa, la señal de error estará  $180^\circ$  fuera de fase con respecto a la excitación.

En la figura 2-4 se muestra el empleo de un potenciómetro en puente de c.a. para comparar las posiciones angulares de dos ejes. En este caso se

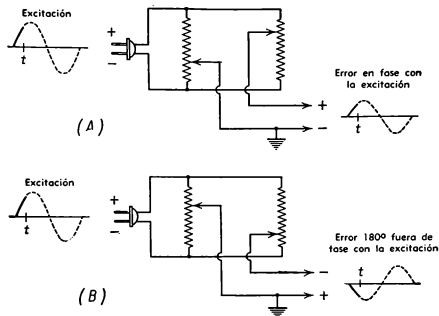


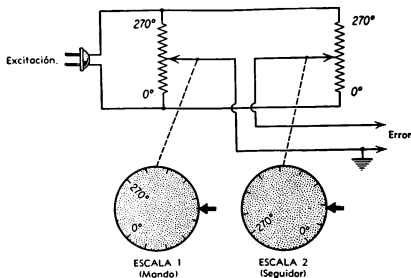
FIG. 2-3. Fuente de c.a.

supone que cada potenciómetro puede girar un ángulo de  $270^\circ$  y que cada eje tiene una escala graduada en grados de rotación. Se supone que la escala 1 ha sido girada  $135^\circ$ ; es decir, que el cursor se encuentra en el centro del elemento resistivo. Si la escala 2 se coloca en un extremo y después se gira hasta el extremo opuesto, la señal de error variará de la forma siguiente:

1. La amplitud de la señal de error decrecerá gradualmente cuando la escala 2 se mueve desde un extremo hacia la posición central ( $135^\circ$ ).
2. Cuando la escala 2 alcanza los  $135^\circ$ , los cursores de los dos potenciómetros estarán al mismo potencial y no se producirá señal de error.
3. Cuando la escala 2 gire desde los  $135^\circ$  hasta el extremo opuesto, la señal de error aumentará en amplitud. Esta señal de error estará  $180^\circ$  desfasada con respecto a la señal de error producida cuando la escala 2 está al otro lado de la posición central ( $135^\circ$ ).

La señal de error producida por el puente de la figura 2-4 puede ampli-

ficarse y aplicarse a un motor reversible cuyo sentido de giro quede determinado por la fase de la tensión que lo excita. El motor girará en un sentido si la escala 2 señala una lectura más alta que la escala 1, y en sentido contrario si la escala 2 indica una lectura más baja. Si el motor está acoplado mecánicamente al eje de la escala 2, el circuito se convierte en autoajustable



| ESCALA 1    | ESCALA 2    | ERROR | ERROR EN FASE CON LA EXCITACION |
|-------------|-------------|-------|---------------------------------|
| $135^\circ$ | $270^\circ$ |       | $0^\circ$                       |
| $135^\circ$ | $150^\circ$ |       | $0^\circ$                       |
| $135^\circ$ | $135^\circ$ |       |                                 |
| $135^\circ$ | $120^\circ$ |       | $180^\circ$                     |
| $135^\circ$ | $0^\circ$   |       | $180^\circ$                     |

FIG. 2-4. Comparación de las posiciones de los ejes

o detector de cero. Cuando las dos escalas no estén en la misma posición, se producirá una señal de error y el motor girará. Este giro, acoplado al eje de la escala 2, continuará hasta que indique la misma lectura que la escala 1. La señal del error será entonces cero y el motor se detendrá. La escala del eje seguidor repetirá cualquier movimiento de la escala del eje de mando.

## 2 - 3. Resolución

Los potenciómetros diseñados para ser usados en servomecanismos son de mejor calidad y de más exactas especificaciones de fabricación que los empleados en radio y televisión. En el control de volumen de un amplificador de audiofrecuencias tiene poca importancia que el mando tenga que ser avanzado 75 grados en vez de 70 para alcanzar el volumen deseado. Sin embargo, un error de 5 grados en el eje de giro de un servomecanismo no es tolerable en la mayor parte de los casos.

Una de las características más importante de los potenciómetros diseñados para uso en los servomecanismos es su *resolución*. La resolución de un potenciómetro está determinada por el mínimo cambio de resistencia (entre el cursor y uno de los extremos del elemento resistivo) que se produce al girar el eje. En los potenciómetros bobinados, que frecuentemente se emplean en servomecanismos, el mínimo cambio de resistencia queda determinado por el tamaño del hilo y por la longitud de cada vuelta. Como se ilustra en la figura 2-5, el potenciómetro bobinado está formado por una determinada longitud de hilo resistivo arrollado sobre un aislante en forma semicircular. Cuando se gira el eje del potenciómetro, el cursor se desplaza sucesivamente de una espira a la siguiente. Si el cursor de la figura 2-5 se mueve desde la espira X hasta la Y, la resistencia entre el cursor y un extremo del elemento resistivo variará una cantidad igual a la resistencia de una espira de hilo. Esta es la mínima cantidad que puede hacerse variar la resistencia y depende del tamaño y de la resistividad del hilo, así como de la longitud de cada espira. Como los cambios de resistencia son discretos cuando el cursor se desplaza de una espira a la siguiente, la resistencia variará a saltos cuando gire el eje. Los saltos han sido exagerados para mayor claridad en la ilustración. En la figura 2-5 se muestra la variación de la resistencia en función del ángulo girando por el eje. En un potenciómetro real el número de saltos es mucho mayor, así como es mucho menor la amplitud de cada salto. Los saltos que se muestran en la figura 2-5 han sido trazados suponiendo que el ancho del cursor es igual al espacio entre espiras; es decir, que el cursor hace contacto con una espira en el instante que deja de tocar a la precedente. En la práctica, el cursor se hace suficientemente ancho como para solapar varias espiras y proporcionar un mejor contacto eléctrico, pero aun así, la resistencia sigue cambiando escalonadamente.

La resolución de un potenciómetro se expresa en términos de *resolución de tensión* o *resolución angular*. La resolución de tensión expresa la relación del *cambio de tensión por salto* a la *tensión total de excitación*. Por ejemplo,

si se aplica un potencial de excitación de 5 volt a un potenciómetro de 1.000 espiras, la amplitud de los saltos de tensión será de 0,005 volt (se supone que el cursor hace contacto con una sola espira cada vez). La tensión en el

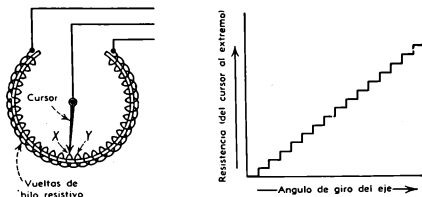


FIG. 2-5. Resolución de un potenciómetro

cursor variará a saltos de 5 milivolt cuando se desplace de una espira a la siguiente. La resolución de tensión es:

$$\frac{\text{Tensión por salto}}{\text{Tensión de excitación}} = \frac{0,005}{5} = 0,001 = 0,1 \%$$

Como se indica anteriormente, la resolución puede expresarse en tanto por ciento. Los valores típicos de la resolución para potenciómetros diseñados para ser empleados en servomecanismos son generalmente de 0,1 a 0,002 por ciento.

La *resolución angular* de un potenciómetro es numéricamente igual al ángulo total que ocupa el bobinado dividido por el número total de espiras (suponiendo que están igualmente espaciadas). La resolución angular expresa el número de grados que debe girar el eje para que la tensión de salida varíe la cantidad correspondiente a un salto; es decir, lo que corresponde a desplazar el cursor desde el centro de una espira al centro de la siguiente. Por ejemplo, si el elemento resistivo tiene 2.000 espiras y se extiende sobre un ángulo de 320°, la resolución angular es:

$$\frac{320}{2.000} = 0,160 \text{ grados por espira}$$

Puede mejorarse la resolución empleando mayor número de espiras, pero esto deviene limitado por consideraciones prácticas como son el tamaño total del potenciómetro y el diámetro mínimo del hilo. Si se emplea un hilo de

menor diámetro puede aumentarse el número de espiras sin aumentar las dimensiones totales, pero cuanto más delgado es el hilo menos resistencia mecánica tendrá y se destruirá antes por efecto de la fricción del cursor.

La resolución es un factor importante en el diseño de servomecanismos porque determina el mínimo valor de la señal de error. Puede ocurrir, por ejemplo, que la tensión extraída por el cursor de un potenciómetro seguidor sea 85 milivolt en una espira y 95 milivolt en la siguiente. Si la tensión en el cursor del potenciómetro de mando es 87 milivolt, no puede realizarse un equilibrio exacto. El potenciómetro seguidor *oscilará* adelante y atrás entre dos espiras sucesivas buscando un valor de tensión que no puede encontrar. La magnitud del salto de tensión entre espiras puede reducirse disminuyendo el valor de la tensión de excitación. Este procedimiento se traduce en una disminución de la magnitud de la señal del error para una determinada diferencia de posición entre el eje de mando y el eje seguidor. En estas condiciones será preciso más amplificación para llevar la señal de error al nivel necesario para gobernar el motor, o cualquier otro dispositivo corrector del error.

Los potenciómetros del tipo de pista se caracterizan por tener mejor resolución que los bobinados. En estos tipos, el elemento resistivo está constituido por una capa fina de carbón o metal depositada sobre un material aislante. La tensión de excitación se aplica en los extremos de la película resistiva y el cursor se desplaza sobre la superficie extrayendo una tensión que depende de su posición con respecto a los extremos. En teoría, la resolución de este tipo de potenciómetro es infinita, ya que el cursor se desplaza sobre una superficie continua. En la práctica, sin embargo, la resolución está limitada por el granulado de la película. Aun así, la resolución que se obtiene es muy superior a la de los potenciómetros bobinados. Una desventaja de este tipo de potenciómetro es que la película resistiva varía con la temperatura y la humedad (en mucha mayor proporción que para un potenciómetro bobinado en las mismas condiciones ambientales).

## 2 - 4. Linealidad

La linealidad de un potenciómetro es una medida de su capacidad para producir iguales cambios en la tensión de su cursor para iguales cambios en la posición de su eje. En un potenciómetro perfectamente lineal, la tensión en el cursor para un ángulo del eje de  $80^\circ$  deberá ser exactamente el doble de la tensión correspondiente a un ángulo de  $40^\circ$ . Esta característica del potenciómetro puede expresarse de otra forma: la tensión en el cursor deberá cambiar a un promedio constante cuando el eje gira a un promedio constante.

La figura 2-6 muestra un gráfico de la tensión del cursor en función del ángulo girado por el eje en un potenciómetro perfectamente lineal. En un potenciómetro bobinado, la tensión en el cursor varía a saltos, como se explicó anteriormente. Desde el punto de vista de la linealidad, los saltos pueden ser "promediados" y la linealidad representada por una línea continua, como se

muestra en la figura 2-6. En la práctica, los límites de precisión de fabricación establecen los límites de linealidad que pueden obtenerse. Las desviaciones respecto a una linealidad perfecta pueden atribuirse a tres causas: (1) el hilo resistivo no puede tener un diámetro constante a lo largo de todo el bobinado;

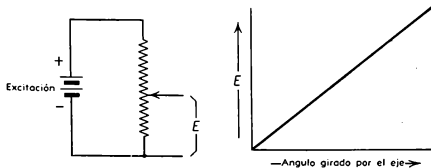


FIG. 2-6. Linealidad de un potenciómetro

(2) las vueltas no pueden estar igualmente espaciadas, y (3) las vueltas no pueden tener idéntico tamaño; es decir, una vuelta puede ser algo mayor que otra. Como resultado de estas limitaciones, la curva real (tensión en función del ángulo girado por el eje) no será una línea perfectamente recta. Esto se ilustra en la figura 2-7. Las desviaciones con respecto a una linealidad perfecta se han exagerado para mayor claridad.

La linealidad de un potenciómetro se expresa normalmente en términos

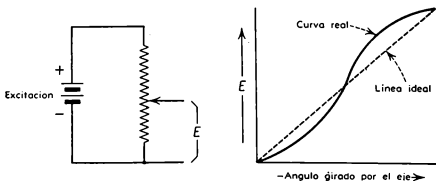


FIG. 2-7. Linealidad ideal y real

de la separación de la línea ideal en el punto donde la desviación es máxima. Supongamos, por ejemplo, que la tensión en el cursor es 4,96 volt cuando la línea ideal indica que debe ser 5 volt y que éste es el punto de máxima desviación de la línea ideal. Si la tensión de excitación es de 20 volt la linealidad es:



$$\frac{5 - 4,96}{20} = \frac{0,04}{20} = 0,002 = 0,2 \%$$

La falta de una linealidad perfecta va en detrimento de las aplicaciones de los servomecanismos, ya que se traduce en la aparición de una señal de error cuando los ejes del mando y del seguidor están perfectamente alineados. El cursor del eje de mando puede tener, por ejemplo, 5 volt y el cursor del eje del seguidor 4,96 volt (con ambos ejes en la misma posición angular). En estas condiciones aparecerá una señal del error de 0,04 volt y el motor se pondrá en marcha. El eje seguidor se moverá hasta que su cursor encuentre una tensión de 5 volt. El resultado final será que el eje de mando y el eje seguidor no estarán alineados. Además, puede ocurrir que uno de los potenciómetros se desvíe "por encima" de la línea recta el mismo ángulo que el otro se desvía "por debajo". Esto producirá una desalineación entre el eje de mando y el del seguidor aún mayor.

La linealidad de un potenciómetro puede mejorarse empleando una resistencia de compensación en serie o *trimmer*. Consideremos, por ejemplo, el potenciómetro que se muestra en la figura 2-8 (A). Con una tensión de

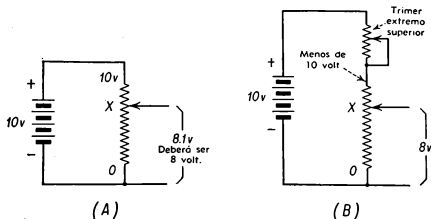


Fig. 2-8. Empleo del trimmer extremo superior

excitación de 10 volt, el punto X (situado a ocho décimos de la longitud del elemento resistivo) proporcionará un potencial de 8 volt. Supongamos que, por falta de linealidad, este punto se encuentra a un potencial de 8,1 volt. La tensión en el punto X puede reducirse a su valor correcto (8 volt en vez de 8,1 volt) empleando un trimmer de *extremo superior*, como se muestra en la figura 2-8 (B). Una parte de la tensión de excitación cae en el trimmer, quedando menos de 10 volt en el potenciómetro. Como consecuencia de ello, la tensión disminuye en todos los puntos a lo largo del elemento resistivo del potenciómetro. El trimmer puede ajustarse de forma que la tensión en el

punto  $X$  sea exactamente 8 volt, llevando este punto a coincidir con la línea recta ideal.

Sin embargo, no debe creerse que el empleo de un trimer de ajuste de extremo superior permite un ajuste *perfecto* de la linealidad. Cuando el trimer se ajusta para reducir la tensión del punto  $X$  a 8 volt, en el ejemplo anterior, también ha sido reducida la tensión en todos los puntos a lo largo del elemento resistivo. Como consecuencia de ello, los puntos a lo largo del elemento resistivo, que estaban anteriormente al potencial correcto, quedarán ahora a una tensión menor (y los puntos que antes estaban bajos quedarán ahora más bajos todavía). No obstante, el uso de trimer de extremo superior está

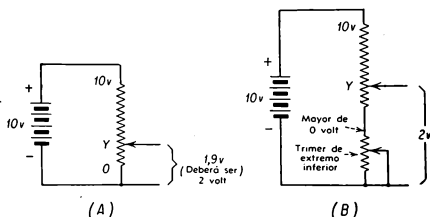


FIG. 2-9. Empleo del trimer de extremo inferior

justificado, ya que las tensiones a lo largo del elemento resistivo cambian menos por debajo del punto  $X$  que por encima. Las tensiones corregidas previamente cambian sólo ligeramente cuando el punto  $X$  se lleva al valor correcto. La variación de la resistencia del trimer produce una mayor variación de tensión en el extremo superior del potenciómetro en correspondencia con una menor variación de tensión en el extremo inferior. El valor de la tensión en el extremo inferior no puede variarse en absoluto; ningún valor de la resistencia del trimer puede reducir la tensión de este punto por debajo de cero. Esta es la razón de emplearse la denominación de trimer de *extremo superior*.

Cuando se emplea un trimer de extremo superior, el extremo superior del potenciómetro estará a una tensión menor que la tensión de excitación; es decir, a la salida no se dispone de la tensión de excitación. Sin embargo, en la mayor parte de las aplicaciones esto no presenta dificultad.

En la figura 2-9 se ilustra el empleo del trimer de *extremo inferior*. Con 10 volt de excitación, el punto  $Y$  (a dos décimos de la longitud del elemento resistivo) estará a una tensión de 2 volt. Supongamos que este punto se encuentra a 1,9 volt como consecuencia de la falta de linealidad del elemento resistivo. La tensión del punto  $Y$  puede ser elevada a 2 volt por medio del

trimer de extremo inferior, como se muestra en la figura 2-9 (B). Como consecuencia de la caída de tensión en el trimer, la tensión aumenta a lo largo de todos los puntos del elemento resistivo del potenciómetro. El trimer puede ajustarse para que la tensión del punto *Y* sea exactamente 2 volt, llevando este punto a coincidir con la línea recta ideal. Sin embargo, la presencia de la resistencia del trimer elevará la tensión de todos los puntos a lo largo del elemento resistivo del potenciómetro. Como consecuencia de esto, los puntos que antes se encontraban a una tensión correcta tendrán ahora una tensión demasiado alta (y los puntos que estaban demasiados altos quedarán más altos todavía). El empleo del trimer de extremo inferior está justificado porque las tensiones del elemento resistivo en los puntos por encima del punto *Y* varían menos que las tensiones de los puntos situados por debajo de dicho punto. Las tensiones corregidas previamente cambian sólo ligeramente cuando la tensión del punto *Y* se lleva al valor correcto. La variación de la resistencia del trimer produce mayores cambios de tensión en el extremo inferior del potenciómetro y menores cambios de tensión hacia el extremo superior. La tensión en el extremo alto del potenciómetro no puede cambiarse en absoluto. No es posible ajustar el trimer para que este punto adquiera una tensión de valor mayor que la tensión de excitación. Esta es la razón del empleo del término trimer de *extremo inferior*.

Cuando se emplea un trimer de extremo inferior, la tensión del cursor no puede reducirse a cero cuando éste se desplaza hasta el extremo inferior del potenciómetro. Sin embargo en la mayoría de las aplicaciones esto no presenta dificultad.

Como el trimer de extremo superior es más efectivo para hacer variar las tensiones en el extremo alto del potenciómetro y el trimer de extremo inferior proporciona variaciones de tensión en las proximidades del extremo inferior, se suelen emplear los dos trimer. Los trimer deben ajustarse para obtener la mejor *distribución del error* posible, de forma que la curva del potenciómetro (tensión del cursor en función del ángulo girado por el eje) no se desvíe más en una dirección que en otra, con respecto a la línea recta ideal. Los trimer también pueden ajustarse para hacer que la curva real del potenciómetro coincida con la curva ideal en determinados puntos o en una determinada región.

Al especificar el porcentaje de desviación con respecto a una linealidad perfecta es muy importante indicar si este porcentaje está basado o no en el empleo de trimer. Algunos fabricantes de potenciómetros de precisión especifican el tanto por ciento de linealidad suponiendo que no se emplean trimer, y otros especifican la linealidad que puede conseguirse *con el empleo de trimer*. Para mayor claridad se emplean los términos: *linealidad terminal*, *linealidad base cero* y *linealidad independiente*. Estos términos se definen a continuación.

*Linealidad terminal* especifica la máxima desviación de la linealidad perfecta del potenciómetro solo (sin trimer).

La linealidad *base cero* especifica la máxima desviación de la linealidad perfecta suponiendo que solamente se emplea un trimer de extremo superior.

La linealidad *independiente* especifica la máxima desviación de la linealidad perfecta suponiendo que se emplean trimer de extremo superior y de extremo inferior.

Otro factor que contribuye a la falta de linealidad y que está directamente relacionado con el potenciómetro es el llamado *efecto de carga*. Esto se ilustra en la figura 2-10. La presencia de una resistencia de carga  $R_L$  (que

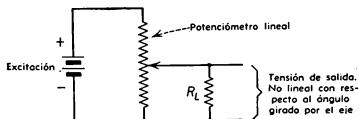


FIG. 2-10. La resistencia de carga destruye la linealidad

puede ser, por ejemplo, la impedancia de entrada del amplificador de error) origina una salida no lineal aunque el potenciómetro sea perfectamente lineal. La resistencia de carga está conectada en paralelo con la porción del elemento resistivo por debajo del cursor. Cuando se desplaza el cursor, esta resistencia paralelo combinada varía a un promedio distinto que la resistencia por encima del cursor. Por tanto, la tensión del cursor deja de ser lineal con relación al ángulo girado por el eje. Este error de carga puede disminuirse: (1) haciendo que el valor de  $R_L$  sea alto; (2) haciendo intencionadamente que el potenciómetro no sea lineal para compensar el error de carga (de esta forma la combinación del potenciómetro con la resistencia de carga producirá una salida lineal), y (3) colocando tomas fijas a lo largo del potenciómetro en las cuales pueden conectarse resistencias para aproximar la característica ideal recta.

## 2 - 5. Conformidad

Algunas aplicaciones requieren el uso de potenciómetros no lineales. Por ejemplo, puede ser necesario que la tensión del cursor varíe de acuerdo con el *seno* del ángulo girado por el eje. En este tipo de potenciómetro, la tensión del cursor alcanzará la mitad de su valor máximo cuando el eje haya girado  $30^\circ$  ( $\text{sen } 30^\circ = 0,5$ ), y alcanzará el valor máximo cuando el eje haya girado  $90^\circ$  ( $\text{sen } 90^\circ = 1$ ). En la figura 2-11 se muestra un gráfico de la tensión del cursor en función del ángulo girado por el eje.

Como resulta confuso (y carece de significado) referirse a "linealidad" de un potenciómetro que intencionadamente no es lineal, se emplea el término

*conformidad* para especificar la correspondencia que existe entre la curva real de un potenciómetro no lineal y la curva deseada. La conformidad se especifica en tanto por ciento de desviación con respecto a la curva deseada (en el punto en que la desviación es máxima). Esta desviación máxima se expresa en tanto por ciento de la tensión de excitación aplicada. Como en el caso de las consideraciones hechas para la linealidad, la conformidad puede expresarse como *terminal* o *independiente* según se emplee o no trimer.

A veces se diseñan potenciómetros no lineales que tienen una *función respecto al ángulo* de giro de su eje, menor que el ángulo total que ocupa el

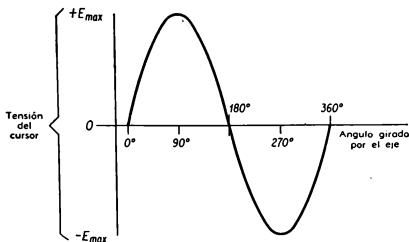


FIG. 2-11. Tensión del cursor en función del ángulo girando por el eje en un potenciómetro senoidal

bobinado. Por ejemplo, un potenciómetro puede tener un ángulo total de giro de  $320^\circ$ , pero puede estar diseñado para proporcionar una determinada variación a su salida solamente entre los límites de  $20^\circ$  a  $300^\circ$  de giro. En tal caso, la conformidad se especifica en términos de la máxima desviación en tanto por ciento de la excitación correspondiente al ángulo entre cuyos límites es función de salida (de  $20^\circ$  a  $300^\circ$ , en el ejemplo anterior). Algunos fabricantes especifican la conformidad como el valor cresta-cresta para tener en cuenta las desviaciones por encima y por debajo de la curva deseada. *Precisión fraccional constante* es un término que utilizan los fabricantes para especificar la precisión de un potenciómetro no lineal. Este término es similar a la conformidad excepto en que la desviación se expresa en tanto por ciento del valor *correcto* en el punto de máxima desviación, en vez de en tanto por ciento con respecto a la excitación *total*. Como la precisión de un potenciómetro no lineal puede expresarse de muchas formas, es necesario evaluar correctamente las especificaciones de cada fabricante de acuerdo con la definición apropiada. Se disponen de muy diversos tipos de potenciómetros no

lineales *normales* y cualquier forma especial puede conseguirse por petición a los fabricantes. Entre las funciones no lineales más comúnmente disponibles se encuentran la función *seno* (tensión del cursor que varía en función del seno del ángulo girado por el eje), tensión de *ley cuadrática* (tensión del cursor que varía proporcionalmente al cuadrado del ángulo girado por el eje)

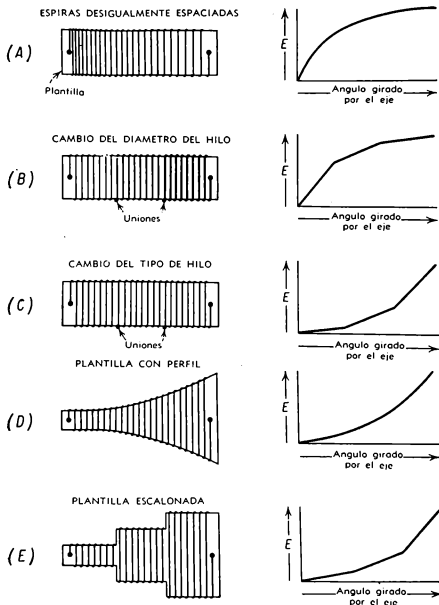


FIG. 2-12. Elementos resistivos no lineales

y *logarítmico* (la tensión del cursor aumenta *logarítmicamente* al aumentar linealmente el ángulo girado por el eje).

Un potenciómetro puede hacerse no lineal de las siguientes formas:

1. Bobinando el hilo resistivo desigualmente espaciado a lo largo del elemento. Figura 2-12 (A).

2. Cambiando a intervalos el diámetro del hilo resistivo, consiguiendo un número de segmentos en "línea recta" que aproximan la curva deseada. Figura 2-12 (B).

3. Empleando distintos tipos de hilo resistivo (material) a lo largo del elemento. Figura 2-12 (C).

4. Empleando plantillas con perfil de forma que la longitud del hilo por espira varíe a lo largo del elemento resistivo. Figura 2-12 (D).

5. Empleando plantillas escalonadas que equivalen a un determinado número de segmentos lineales conectados en serie. Figura 2-12 (E).

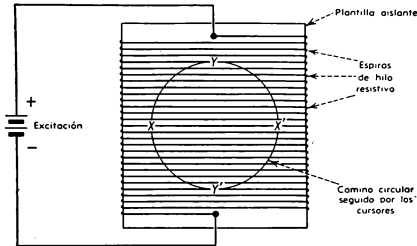


FIG. 2-13. Potenciómetro de plantilla cuadrada

Dos o más de las técnicas expuestas pueden emplearse en un elemento resistivo simple para obtener el tipo de no linealidad deseada. En los potenciómetros del tipo de película resistiva depositada sobre el aislante puede obtenerse la función no lineal deseada con una película de ancho no uniforme.

Se pueden conseguir ciertos tipos de no linealidad conectando una resistencia exterior entre el cursor y uno de los extremos del elemento resistivo. Los valores de esta resistencia de "carga" y del elemento resistivo del potenciómetro determinan la forma de la curva no lineal. Algunos potenciómetros cuentan con una serie de tomas fijas para poder conectar en ellas resistencias y de esta forma aproximar la función deseada.

Otra forma útil de potenciómetros no lineales es el llamado potenciómetro de plantilla *cuadrada*. Como se muestra en la figura 2-13, la plantilla se

bobina con espiras espaciadas de hilo resistivo y el eje del potenciómetro mueve dos cursores que hacen contacto a lo largo de un círculo sobre el hilo resistivo. Cuando el eje se encuentra en la posición de  $0^\circ$ , los dos cursores están sobre los puntos marcados  $X$  y  $X'$  en la figura 2-13. En este momento los cursores equidistan de los extremos del hilo resistivo y la diferencia de potencial entre ambos es prácticamente cero. La tensión de salida (diferencia de potencial entre los dos cursores) varía de acuerdo con el seno del ángulo girado por el eje. Si el eje se mueve hasta la posición de  $90^\circ$ , los cursores quedarán sobre los puntos marcados  $Y$  e  $Y'$ . En este momento, el número de espiras entre los cursores es máximo, y la tensión entre ambos es, por tanto, máxima. Cuando el eje gira más allá de  $90^\circ$ , el número de espiras entre los cursores disminuye de nuevo, de forma que la tensión de salida (como el seno de un ángulo) disminuye entre  $90$  y  $180^\circ$ . Cuando el eje está en los  $180^\circ$ , los dos cursores se encuentran de nuevo al mismo potencial ( $\text{sen } 180^\circ = 0$ ). Cuando el eje del potenciómetro gira más de  $180^\circ$ , el número de espiras entre los dos cursores aumenta nuevamente. Sin embargo, ahora la polaridad de la tensión de cursor a cursor es opuesta a la que había al alcanzar los  $180^\circ$  la primera vez. Cuando el ángulo girado por el eje alcance los  $270^\circ$  la tensión de salida vuelve a ser máxima y después decrece hasta que el eje alcance de nuevo los  $360^\circ$ . Se puede emplear otro par de cursores situados a  $90^\circ$  con los anteriores para obtener una tensión de salida proporcional al *coseno* del ángulo girado por el eje. Las unidades de este tipo se conocen con el nombre de potenciómetros seno-coseno.

## 2 - 6. Construcción de potenciómetros

Una resistencia bobinada contiene muchas espiras de hilo aislado con esmalte sobre una plantilla aislante o sobre una varilla de metal cubierta de esmalte. Este elemento resistivo se monta en la caja del potenciómetro en tal forma que el cursor, controlado por el eje, pueda deslizarse a lo largo de una pista formada por una parte del hilo donde ha sido quitado el esmalte. Varios factores determinan la clase de hilo que debe emplearse. Es preferible el empleo de hilo de pequeño diámetro porque puede colocarse mayor número de espiras para unas dimensiones determinadas del elemento resistivo, mejorando de esta forma la resolución del potenciómetro. Sin embargo, hilos mayores ofrecen la ventaja de una mayor resistencia mecánica y una mayor capacidad de disipación. El tamaño del hilo es también un factor importante en consideración a la duración, porque los hilos delgados se desgastan más rápidamente por el rozamiento del cursor. El tamaño del hilo seleccionado para una determinada aplicación representa un compromiso entre estos factores. La resistividad del hilo (tipo de material) se selecciona de acuerdo con la resistencia total requerida y el coeficiente de temperatura permisible.

Los contactos de metal del cursor deben cumplir satisfactoriamente ciertas características mecánicas y eléctricas. Deben tener alta conductividad eléctrica, bajo desgaste, y no producir partículas abrasivas que interfieren el



buen contacto eléctrico. La presión del contacto con el hilo resistivo no debe ser ni muy grande ni muy pequeña. Una presión excesiva produce desgaste y reduce el tiempo de vida del potenciómetro. Una presión insuficiente produce un mal contacto eléctrico y origina un alto nivel de ruido. El ruido en los potenciómetros se produce por fricción entre el cursor y el hilo, por chispas en el contacto o por la presencia de polvo u otras partículas sobre el elemento resistivo. La presión del contacto es también un factor importante por otra razón. Cuanto mayor es la presión tanto mayor es el par (fuerza mecánica) requerido para desplazar el cursor. En algunas aplicaciones se requieren potenciómetros de bajo par; ello es debido a la pequeña fuerza disponible para mover el cursor. Por ejemplo, cuando el cursor es movido por un sistema de vacío que responde a la presión del aire.

La continuidad eléctrica entre el cursor móvil y un terminal exterior se establece por medio de dispositivo de anillo. Un contacto de metal precioso sobre una pista plateada constituye una buena continuidad eléctrica y posee un bajo nivel de ruido.

Cada uno de los extremos del hilo resistivo se une a una placa de metal que recibe el nombre de *fin de carrera* (fig. 2-14). Esta placa está fija a la plantilla aislante y asegura un deslizamiento suave al pasar el cursor desde la

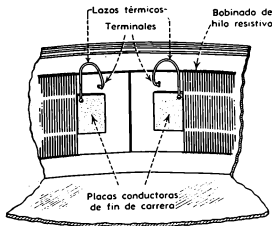


FIG. 2-14. Placas fin de carrera y lazos térmicos

última espira hasta ella. Excepto en el caso de potenciómetros de giro continuo, se coloca un tope mecánico que limita el movimiento del cursor. Este tope mecánico está situado de tal forma que cuando el eje llega al extremo del ángulo de giro, el cursor se apoya sobre la placa de fin de carrera. La placa de fin de carrera tiene un ancho aproximado de 10°. Como se indica en la figura 2-14, las placas de fin de carrera están conectadas por un hilo a los terminales del potenciómetro. Cuando se sueldan cables a los

terminales, el lazo de este hilo disminuye la cantidad de calor que pueda llegar al hilo resistivo.

Los términos ángulo de *fin de carrera*, ángulo total del *bobinado* y *continuidad* se ilustran en la figura 2-15. El ángulo total del bobinado se mide desde un extremo del hilo resistivo al otro; es decir, el ángulo ocupado por el hilo desde la primera espira hasta la última. El ángulo de continuidad

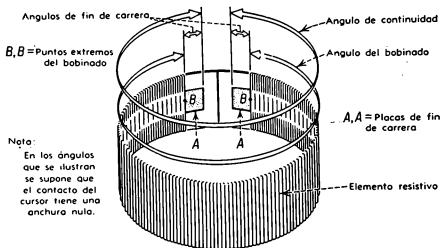


FIG. 2-15. Ángulos de fin de carrera, de bobinado y continuidad

incluye el ángulo del bobinado y el ángulo de fin de carrera. El término *ángulo mecánico* suele emplearse para indicar el ángulo total que puede girar el eje del potenciómetro. Este ángulo está limitado por la situación de los topes mecánicos.

La caja del potenciómetro es de metal o de plástico moldeado, o de ambos materiales combinados. Para evitar la entrada del polvo y que éste se deposite sobre el elemento resistivo, la caja está totalmente cerrada excepto por el hueco que queda entre el eje y el cojinete de bronce fosforoso por el que el eje pasa. El eje y el cojinete deben ajustar perfectamente para asegurar el cierre a la entrada del polvo. Se emplea un cierre engrasado para mayor estanqueidad. Si el eje queda demasiado ajustado en el hueco de salida se produce un aumento del par resistente al giro. Por esta razón en los potenciómetros de bajo par se emplean cojinetes de bolas.

La industria dispone de potenciómetros de construcción especial para cubrir todas las especificaciones según las diferentes aplicaciones. Estas características especiales de construcción se describen a continuación.

### *Potenciómetros solidarios*

El eje del potenciómetro pasa a través de la caja de forma que pueden conectarse mecánicamente y hacerse solidarios varios potenciómetros y ser controlados simultáneamente por un mismo eje. Como consecuencia de las variaciones y limitaciones mecánicas, puede ocurrir que el cursor de uno de los potenciómetros se encuentre varias espiras de hilo por "delante" o por "detrás" del cursor de otro. El montaje está dispuesto de tal forma que cada uno de los potenciómetros puede girarse individualmente una pequeña cantidad sobre el eje común. De esta forma puede hacerse un ajuste para que todos los cursores coincidan en la misma espira. Este proceso se denomina *alineación* de los potenciómetros.

### *Potenciómetro de hilo deslizante*

En aquellas aplicaciones en que se requiere una gran resolución se emplean potenciómetros de pista o de hilo deslizante. El potenciómetro de hilo deslizante consiste en una sola espira de hilo parcialmente embebida en un aislante, como se muestra en la figura 2-16. Cuando gira el eje, el cursor

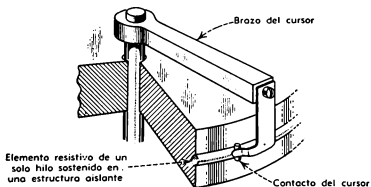


FIG. 2-16. Construcción del potenciómetro de hilo deslizante

se desplaza a lo largo de la longitud del hilo y proporciona una variación continua de la salida. Una desventaja de este tipo de potenciómetro es que la resistencia total del hilo es baja. Pueden introducirse errores como consecuencia de la resistencia de los terminales de salida, así como por la resistencia de contacto que puede ser un porcentaje elevado de la resistencia total. Las ventajas de este tipo de construcción son las de proporcionar una resolución y una linealidad excelentes, así como pequeño desgaste y muy bajo par resistente.

### *Potenciómetro de desplazamiento lineal*

La característica de un potenciómetro de desplazamiento lineal es que el movimiento del eje es de traslación (adelante y atrás) en vez de ser de rotación. Este tipo, que también se conoce con el nombre de potenciómetro de *traslación*, cuenta con un elemento resistivo recto en vez de circular o curvado. El elemento puede ser de hilo bobinado o de película depositada y en ambos tipos se fabrican para funciones lineales o no lineales.

### *Potenciómetro de varias vueltas*

El potenciómetro de varias vueltas se distingue en su construcción del de una sola vuelta por su forma, que permite un ángulo de giro de su eje mayor de  $360^\circ$  (al mover del cursor desde un extremo al otro del elemento resistivo). Se dispone de modelos desde tres hasta diez vueltas ( $1080^\circ$  a  $3600^\circ$ ). El hilo resistivo está bobinado sobre un núcleo cilíndrico que a su vez se arrolla en forma de hélice, como se muestra en la figura 2-17. La construcción

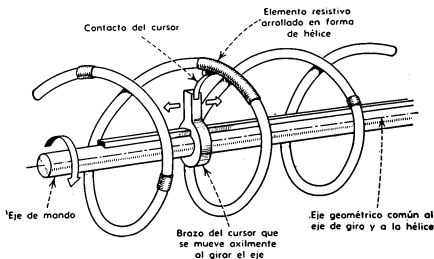


FIG. 2-17. Construcción del potenciómetro de varias vueltas

mecánica está hecha de tal forma que el contacto del cursor se desplaza a lo largo de la hélice cuando se gira el eje. En algunos modelos el hilo resistivo está arrollado en forma de hélice, resultando de esta forma un potenciómetro de hilo deslizante de varias vueltas.

La ventaja del potenciómetro de varias vueltas es la de poder colocar un hilo resistivo muy largo en una caja relativamente pequeña, permitiendo un aumento de la resolución sin aumentar las dimensiones. Las desventajas

son: la lentitud (para llevar el cursor a la posición deseada), tener un mayor par resistente y presentar mayor reactancia inductiva a la frecuencia de excitación.

El eje de un potenciómetro de varias vueltas ha de girar varias revoluciones completas para desplazar el cursor a lo largo de todo el elemento resistivo. Para indicar la posición del eje hace falta colocar escalas o contadores con indicación de varias vueltas. En la figura 2-18 se muestra un

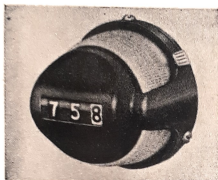


FIG. 2-18. Contador para la lectura directa de diez vueltas

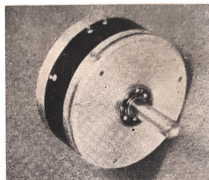


FIG. 2-19. Potenciómetro de precisión con cojinete de bolas para soporte del eje

cuentavueltas de este tipo. Este contador de diez vueltas muestra tres cifras en presentación lineal; los números aparecen negros sobre blanco y blancos sobre negro para mayor facilidad de lectura.

## SUMARIO

En los circuitos detectores del error se emplean normalmente potenciómetros de precisión. Dos potenciómetros conectados en puente producirán una tensión de error proporcional a la diferencia angular de sus ejes. Si se aplica una excitación de c.c. al puente, la señal de error será una tensión de c.c. cuya magnitud y polaridad dependerá del valor y el sentido del desequilibrio del puente. En los servomecanismos, el eje de uno de los potenciómetros está conectado mecánicamente al motor corrector del error. Este potenciómetro *seguidor* repetirá el movimiento del eje del otro potenciómetro (*mando*).

La tensión en el cursor de un potenciómetro bobinado varía a pequeños saltos cuando el cursor se desplaza de una espira a otra del elemento resistivo. La amplitud de estos saltos determina la *resolución* del potenciómetro. Los potenciómetros de película tienen mejor resolución porque el cursor se desplaza

sobre una pista continua. Sin embargo, estos tipos son más afectados por las condiciones ambientales de temperatura y humedad.

Generalmente, se desea que la tensión del cursor varíe linealmente con respecto al ángulo girado por el eje. Las desviaciones respecto a una linealidad perfecta son inevitables como consecuencia de las limitaciones de precisión en la fabricación. Normalmente se emplean resistencias de ajuste para mejorar la linealidad de los potenciómetros.

Algunas aplicaciones requieren el empleo de potenciómetros no lineales; por ejemplo, potenciómetros seno-coseno, de ley cuadrática y logarítmicos. Estas características no lineales se consiguen variando el diámetro del hilo resistivo, empleando distintos materiales o empleando plantillas escalonadas o con perfiles. La curva real, *tensión del cursor* en función del *ángulo girado* por el eje, no coincide con las características deseadas debido a las tolerancias de fabricación. Estas diferencias vienen expresadas por la *conformidad* del potenciómetro.

En algunas aplicaciones se requieren procesos de fabricación especial; por ejemplo, en los potenciómetros solidarios, en los de hilo deslizante, en los de desplazamiento lineal y en los de varias vueltas.

#### PREGUNTAS

1. ¿Qué significa la *resolución* de un potenciómetro?
2. Explicar la diferencia entre resolución de tensión y resolución angular.
3. ¿Qué factores determinan la amplitud de la resolución de los *saltos* en un potenciómetro bobinado para una tensión de excitación determinada?
4. Comparar los potenciómetros bobinados con los de película depositada respecto a la resolución.
5. ¿Qué se entiende por *linealidad* de un potenciómetro?
6. Explicar la diferencia entre linealidad terminal y linealidad independiente.
7. ¿Qué es *error de carga*?
8. ¿Cuál es la diferencia entre linealidad y conformidad?
9. Describir la construcción de un potenciómetro de plantilla con perfil, de uno de plantilla escalonada y de uno de plantilla cuadrada.
10. Explicar la diferencia entre ángulo de *bobinado* y ángulo de *continuidad*.
11. ¿Qué es un potenciómetro de traslación?
12. Señalar una ventaja y una desventaja de un potenciómetro de varias vueltas comparado con uno de una sola vuelta.

**DETECTORES DEL ERROR: TRANSDUCTORES****3 - 1. Introducción**

Las técnicas de los servomecanismos se emplean en la industria para la medida o el control (o ambas cosas) de variables físicas, como la temperatura, la presión, la circulación de un líquido, etc., etc. En la figura 3-1 se muestra un diagrama en bloques generalizado de un controlador registrador de temperatura. La tensión desarrollada en el par termoelectrónico (determinada por la temperatura a que está expuesto) es opuesta a la tensión derivada de un potenciómetro conectado a una fuente de tensión *estándar*. Cuando la tensión del cursor es exactamente igual a la tensión del par termoelectrónico, ambas tensiones se anulan y no hay entrada en el amplificador. En estas condiciones el motor no gira. Si varía la temperatura, la tensión del par termoelectrónico no anulará exactamente la tensión del potenciómetro. El amplificador recibirá a su entrada una señal igual a la diferencia de estas tensiones. La entrada será positiva o negativa según que la tensión del par termoelectrónico sea mayor o menor que la tensión del potenciómetro; es decir, según que la temperatura aumente o disminuya. El motor, conducido por la salida del amplificador, girará en un sentido o en el contrario según que la temperatura haya aumentado o disminuido. Como el motor está acoplado mecánicamente (a través de un engranaje de reducción) al eje del potenciómetro, la posición del cursor variará cuando el motor gire. El giro del motor continuará hasta que el cursor del potenciómetro encuentre una tensión que anule el nuevo valor de la tensión del par termoelectrónico. En este momento el circuito está de nuevo equilibrado, no hay salida en el amplificador y el motor se detiene.

El eje del motor se encuentra a su vez conectado mecánicamente a un índice que se mueve sobre una escala calibrada. Como el motor gira cada vez que la temperatura cambia, y como el motor desplaza al índice sobre una escala calibrada, se obtiene una indicación visual de la temperatura. Cuando se quiera obtener un registro de la variaciones de la temperatura, el motor se acopla a una pluma registradora. Esta pluma, desplazándose a lo largo de un eje roscado, marca sobre un papel movido por un motor de velocidad constante. Las variaciones de temperatura originan un desplazamiento de la

pluma a uno u otro lado sobre el papel, trazando un gráfico que muestra las variaciones de temperatura con respecto al tiempo. A veces se emplea un sistema de poleas en vez del eje roscado que se muestra en la figura 3-1, pero el resultado es el mismo.

Si se quiere que el instrumento actúe como controlador además de registrador, el eje del motor se conecta a un dispositivo de regulación de temperatura, por ejemplo, la válvula de una tubería de combustible. Un

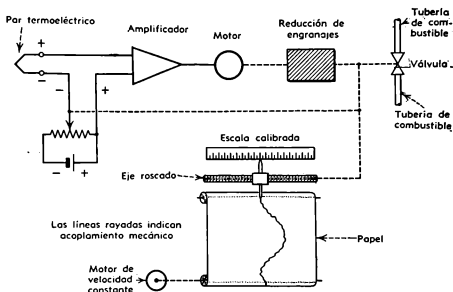


Fig. 3-1. Sistema registrador y controlador de temperatura empleando la técnica de los servomecanismos

aumento de temperatura hará que el motor gire en el sentido conveniente para reducir el paso de combustible a través de la válvula. Una disminución de la temperatura hará que el motor "abra" más el paso de la válvula. De esta forma se regula la circulación de combustible para mantener una temperatura constante.

El par termoelectrico y el potenciómetro en la figura 3-1 funcionan como un detector del error, proporcionando una señal del error cuando las dos tensiones no son iguales. Para la medida y control de otra variable distinta de la temperatura se sustituye el par termoelectrico por otro tipo de transductor. Por ejemplo, un transductor sensible a la presión, como el que se muestra en la figura 3-2, puede sustituir al par termoelectrico sensible a la temperatura. La tubería que parte del fuelle se extiende hasta el recipiente cuya presión se quiere registrar o regular. Si esta presión aumenta, el fuelle se expande, y una disminución de presión hará que el fuelle se retraiga (debido a su "elasticidad" y a la presión atmosférica). El movimiento mecá-



nico del fuelle se transmite a una placa opaca que obstruye el paso de un haz luminoso, que incide sobre una célula fotoeléctrica. De esta forma, la iluminación y la salida de tensión de la fotocélula varían de acuerdo con los cambios de presión. Como consecuencia de todo esto, la pluma, arrastrada

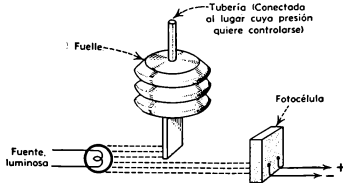


FIG. 3-2. Técnica sensible a la presión

por el motor en la figura 3-1, trazará una curva que muestra las variaciones de la presión con respecto al tiempo. Si se quiere regular la presión, al mismo tiempo que se registra, bastará acoplar el motor mecánicamente a una válvula reguladora de presión.

### 3 - 2. Transductores sensibles a la posición

El transformador diferencial, que en principio es similar a un transformador convencional, cuenta con un bobinado primario, dos bobinados secundarios idénticos y un núcleo o armadura móvil. Los bobinados secundarios están conectados en serie y en oposición, de forma que las tensiones inducidas se anulen y la magnitud y fase de la salida del secundario (error) dependen de la posición del núcleo. Cuando el núcleo (llamado también armadura) está centrado como se indica en la figura 3-3 existe el mismo acoplamiento entre el primario y *ambos* secundarios. Como las tensiones de los dos secundarios son de la misma magnitud, se anulan y no existe salida del error. La polaridades del primario y secundario que se indican en la figura 3-3 se refieren a medio ciclo de la tensión de excitación. Durante el semiciclo opuesto, la polaridad de los tres bobinados se invierte, de forma que las tensiones de los dos secundarios continúan anulándose.

En la figura 3-3 se supone que la tensión inducida en el bobinado secundario es de 10 volt. Más importante que el valor absoluto de estas tensiones es la *diferencia* de tensión entre los dos secundarios. Esta diferencia es la señal de error. En la figura 3-4, el núcleo se ha desplazado hacia arriba desde su posición central. El secundario 1 es bañado por mayor número de

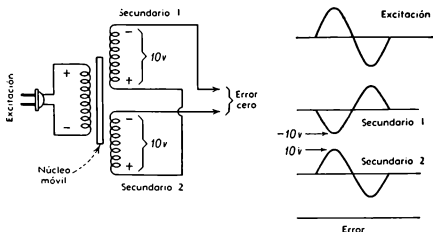


FIG. 3-3. Transformador diferencial con núcleo centrado

líneas de flujo que el secundario 2. Como consecuencia del aumento de acoplamiento del secundario 1 y la disminución de acoplamiento del secundario 2, las tensiones inducidas en ambos secundarios son diferentes. La diferencia, 0,2 volt, aparecerá como señal de error en los terminales de salida. Las polaridades de las tensiones inducidas se muestran para un semiciclo de la tensión de excitación. Como la tensión inducida en el secundario 1 es mayor que la inducida en el secundario 2, la polaridad de la tensión del error es la misma que la tensión del secundario 1. Durante el semiciclo opuesto se invierte la polaridad de todos los bobinados y la polaridad de la tensión de error sigue siendo la misma que la del secundario 1. Como se indica en las

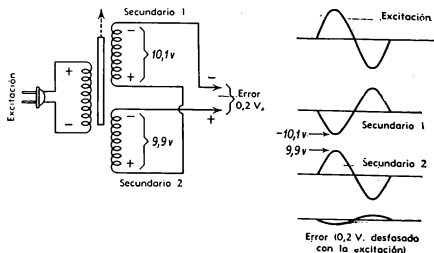


FIG. 3-4. Transformador diferencial con núcleo desplazado hacia el secundario 1

formas de onda de la figura 3-4, la señal de error está  $180^\circ$  desfasada con respecto a la tensión de excitación.

Si el núcleo hubiese sido desplazado hacia abajo, como se muestra en la figura 3-5, la tensión inducida en el secundario 2 sería mayor que la inducida en el secundario 1. La tensión del error estaría entonces *en fase* con la excitación.

En los ejemplos que se muestran en las figuras 3-4 y 3-5, la amplitud de la señal del error es 0,2 volt. Esta magnitud depende de la cantidad que se haya desplazado el núcleo. Si el núcleo se aleja más de su posición central,

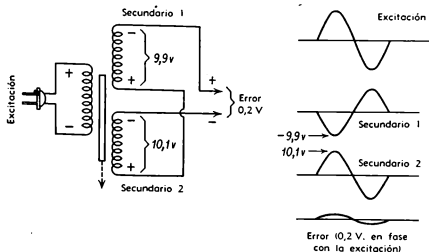


FIG. 3-5. Transformador diferencial con el núcleo desplazado hacia el secundario 2

las tensiones de los dos secundarios se diferenciarán más y la amplitud del error será mayor. La amplitud de la tensión del error depende, por tanto, de la cantidad que se haya desplazado el núcleo; la fase de la señal de error depende del sentido en que se desplace el núcleo desde su posición central.

El transformador diferencial, conocido también como transformador de *desplazamiento*, puede conseguirse en diferentes formas. El transformador *E*, llamado así porque su núcleo recuerda la forma de la letra "E", se muestra en la figura 3-6 (A). El primario está bobinado en la barra central del núcleo *E*, y los secundarios en las barras exteriores. Cuando la armadura se desplaza en cualquiera de las dos direcciones indicadas por las flechas de puntos de la figura 3-6 (A), las tensiones inducidas en los secundarios no se anulan y aparece una señal de error. El movimiento del núcleo puede ser de traslación (en una dirección paralela al eje de la armadura) o de rotación, como se muestra en la figura 3-6 (B). Cuando se emplea movimiento de rotación del núcleo, sólo es permisible un valor determinado de giro. La amplitud de la señal de error depende del desplazamiento angular del núcleo

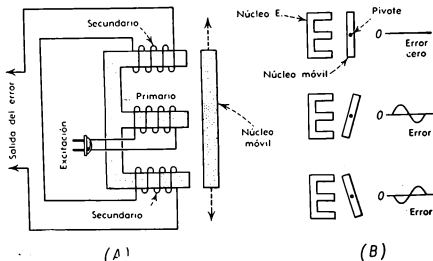


FIG. 3-6. Transformador E

y la fase de la señal de error viene determinada por la dirección del desplazamiento angular.

En la figura 3-7 se muestra otra forma de transformador diferencial. Se trata de un *transformador diferencial de variación lineal* (TDVL), los bobinados primario y secundario forman un hueco tubular donde se introduce el núcleo móvil. El movimiento del núcleo es de traslación y el transformador puede diseñarse de forma que la amplitud del error varíe linealmente con respecto a la posición del núcleo. En la figura 3-8 se muestran varios modelos de transformadores lineales variables.

En teoría, la señal del error de un transformador diferencial es cero cuando el núcleo está exactamente centrado. Sin embargo, existe realmente

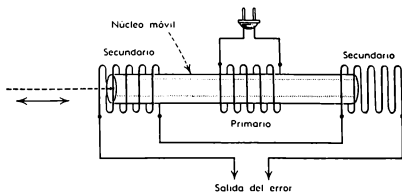


FIG. 3-7. Transformador diferencial de variación lineal

una pequeña señal de error como consecuencia de que los dos secundarios no son exactamente iguales. El núcleo puede cambiarse de posición para compensar esta pequeña diferencia de los dos secundarios, pero esto no anula totalmente la señal de error. El descentrado del núcleo introduce un cambio de fase debido a la diferencia de inductancia de los dos bobinados secundarios.

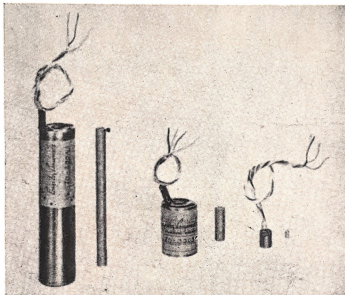


FIG. 3-8. Transductores de movimiento lineal

Como consecuencia de esta diferencia de fases, las tensiones de los secundarios no pueden anularse totalmente aunque tengan la misma amplitud.

Un diseño y construcción esmerada pueden reducir esta tensión *nula* mínima a un valor despreciable.

Transductores inductivos y capacitivos son también útiles en aplicaciones de dispositivos sensibles a la posición. Como se muestra en la figura 3-9 (A), el transductor inductivo consiste en una bobina de hilo y un núcleo de hierro móvil. La posición del núcleo determina el valor de la inductancia y ésta puede usarse en un circuito puente. La salida del puente será una medida de la posición mecánica del núcleo. Asimismo, la inductancia puede formar parte del circuito tanque de un oscilador. En estas condiciones de funcionamiento, la posición mecánica se convierte en una determinada frecuencia de oscilación. A veces se emplean núcleos del tipo E, como se ilustra en la figura 3-9 (B).

El transductor capacitivo, figura 3-9 (C), consiste en dos placas de metal, una fija y la otra móvil. Como la posición de la placa móvil determina la

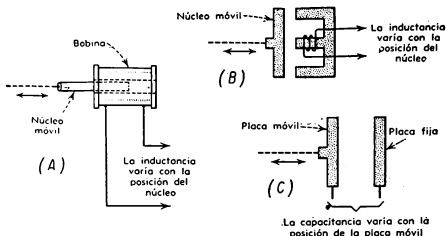


FIG. 3-9. Transductores inductivos y capacitivos

separación entre las dos placas, su posición mecánica deviene en un valor determinado de la capacitancia. Esta capacitancia puede conectarse en un circuito puente o puede emplearse para controlar la frecuencia de un oscilador.

### 3 - 3. Transductores de temperatura

La temperatura es frecuentemente una de las "variables controladas" en un proceso industrial o de fabricación, y los transductores sensibles a la temperatura son muy usados en muchos tipos de equipos de control automático. Las características que debe tener un transductor de temperatura son: (1) sensibilidad a pequeñas variaciones de la temperatura; (2) alta velocidad de respuesta a los cambios de temperatura, y (3) ser capaz de soportar sin dañarse el margen de cambio de temperatura a que esté expuesto. A continuación se describen varios tipos de transductores de temperatura.

#### *Termómetro de resistencia*

El termómetro de resistencia consiste en una bobina de hilo resistivo encerrada en una envuelta protectora. Esencialmente es una resistencia bobinada diseñada para que tenga un gran coeficiente positivo de temperatura. Se emplean hilos de níquel o platino por tener estos materiales una gran variación de resistencia con la temperatura. El termómetro de resistencia puede conectarse en un circuito puente y la salida del puente será función de la temperatura. La envuelta protectora es de chapa delgada para poder obtener una respuesta rápida a los cambios de temperatura.

### *Par termoelectrico o termocupla*

El par termoelectrico consiste en dos hilos de distintos metales unidos en uno de los extremos. Cuando este extremo (conocido como unión caliente) se calienta, aparece una tensión proporcional a la temperatura. Los dos metales que se emplean en un par termoelectrico se escogen para obtener una variación de tensión que sea lineal con respecto a la temperatura, y al mismo tiempo poder soportar altas temperaturas y condiciones ambientes corrosivas. Pares termoelectricos de cobre y constantan se emplean normalmente en un margen de temperaturas entre  $-180$  y  $+320^{\circ}\text{C}$ . Los pares termoelectricos de hierro y constantan se emplean en ambientes con poco oxígeno para evitar la oxidación del hierro. Estos tipos se usan en un margen entre  $-18$  y  $820^{\circ}\text{C}$ . Los pares termoelectricos de cobre-aluminio se emplean en un margen aproximadamente desde  $260$  a  $1.100^{\circ}\text{C}$ .

Los pares termoelectricos están normalmente encerrados en una caja protectora y cuentan con dispositivos para poder fijarlos fácilmente en el interior de hornos, tuberías, etc. La envuelta se reduce al mínimo indispensable para mejorar la velocidad de respuesta con los cambios de temperatura. Cuentan con conductores para poder conectarlos al resto del equipo. Estos conductores suelen ser del mismo metal que se emplea en el par termoelectrico (para evitar el fenómeno termoelectrico en los puntos de unión entre ellos y los metales del par).

### *Termistores*

El termistor en una resistencia sensible a la temperatura que consiste en una mezcla de varios óxidos metálicos (manganeso, cobalto, níquel, etc.) unidos formando un todo de la forma deseada. Las formas más comunes son discos, esferas y varillas. El termistor es generalmente más sensible que el termómetro de resistencia; es decir, que su resistencia tiene mayor variación para un cambio de temperatura dado. El termistor se emplea normalmente conectado en un puente, y la salida del puente es función de la temperatura.

### *Fotocélulas*

La fotocélula se emplea como transductor de temperatura para márgenes más elevados y es de gran utilidad para la medida (y control) en la fundición de metales. El metal fundido emite radiaciones, visibles e infrarrojas, en proporción a su temperatura. Esta radiación, al iluminar el cátodo de la fotocélula produce una emisión electrónica. La corriente de placa de la célula es una medida de la temperatura de fusión del metal.

## **3 - 4. Transductores de presión**

La presión, como la temperatura, es frecuentemente una de la "variables controladas" en un proceso industrial. Los fuelles y los tubos de Bourdon se

emplean, en unión a un dispositivo sensible a la posición, como transductores de presión.

El tubo de Bourdon consiste en un tubo delgado de pared fina ligeramente aplanado para presentar una sección aproximadamente elíptica. El tubo está cerrado en uno de los extremos y doblado en forma semicircular, como se muestra en la figura 3-10 (A). El extremo abierto del tubo se conecta al sistema cuya presión quiere medirse o controlarse. Puede tratarse de presión de aire, gas o de presión de un líquido. La presión en el interior

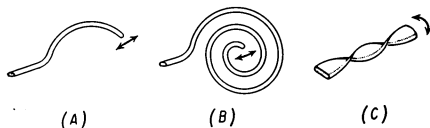


FIG. 3-10. Tubos de Bourdon, semicircular, en espiral y trenzado

del tubo de Bourdon tiende a enderezarlo y por tanto origina un movimiento del extremo cerrado. Mediante una conexión mecánica este movimiento se transmite al núcleo de un transductor inductivo, a la placa móvil de un transductor capacitivo o al cursor de un potenciómetro. De esta forma, los cambios de tensión se convierten en un correspondiente cambio eléctrico.

Los tubos de Bourdon están generalmente contruidos de bronce fosforoso, de cobre berilio o de acero, y son útiles para medidas de presiones hasta unos 700 kg/cm<sup>2</sup>.

Dos variaciones básicas del tubo de Bourdon son el tipo en *espiral* y el tipo *trenzado*, que se ilustran en las figuras 3-10 (B) y 3-10 (C) respectivamente. El tubo en espiral, como su nombre indica, consiste en un tubo largo arrollado en espiral. Esto produce el mismo efecto de varios tubos semicirculares unidos por sus extremos y amplifica el movimiento mecánico del extremo cerrado. Una conexión mecánica adecuada transmite el movimiento a un dispositivo sensible a la posición.

La otra variante es el tubo de Bourdon que está trenzado a lo largo de su eje como indica la figura 3-10 (C). La presión en el interior del tubo tiende a "destrenzarlo" y produce un movimiento de rotación del extremo cerrado. Este movimiento se acopla al eje de un potenciómetro o al núcleo de un transformador diferencial del tipo que se muestra en la figura 3-6 (B).

En márgenes bajos de presión es preferible emplear fuelles en vez de tubos de Bourdon, por ser mayor su fuerza mecánica. Los fuelles se hacen de bronce fosforoso, de acero inoxidable o de latón y se distienden o contraen según la presión. Tanto la pared exterior como la interior del fuelle se pueden poner en contacto con la presión que quiere medirse o controlarse.



En el primer caso, un cambio de presión producirá una contracción del fuelle, y en el segundo caso una distensión. En cualquier caso, el movimiento mecánico, consecuencia de la variación de presión, se conecta a un transductor de posición (por ejemplo un transformador diferencial).

La elasticidad del fuelle puede emplearse para balancear la fuerza aplicada por la presión, pero lo más corriente es emplear un resorte en el interior. Una ventaja de los fuelles con resorte interior es que su movimiento mecánico es más lineal con relación a la presión.

### 3 - 5. Flujo, deformación y humedad

#### *Transductores de flujo*

Los sistemas de control industrial frecuentemente precisan medir el flujo de un gas o de un líquido en una tubería. En una de sus formas más simples, el transductor de flujo contiene un imán permanente montado en forma especial y conectado a la tubería. Un sistema de turbina unida al imán gira a una velocidad determinada por el flujo y el imán induce una tensión en una bobina próxima. La frecuencia de la tensión inducida es función del flujo en el interior de la tubería. En la figura 3-11 se muestra un transductor de flujo para gas.

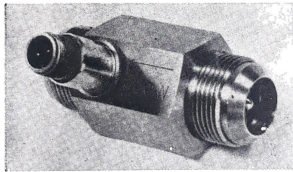


FIG. 3-11. Transductor de flujo

Otro tipo de transductor de flujo emplea el principio de anemómetro de hilo caliente. Se funda en el efecto de enfriamiento de un hilo calentado eléctricamente. La corriente de calentamiento del hilo es suministrada por un generador de corriente constante de forma tal que la temperatura del hilo depende del flujo del líquido. La resistencia del hilo varía con la temperatura y por tanto es una medida del flujo. Como variación de esta técnica puede hacerse que el circuito exterior varíe la corriente en el hilo para mantener la temperatura constante. El valor de esta corriente será, en este caso, proporcional al flujo.

### *Extensiómetros*

La técnica de los calibres extensiométricos se emplea en la medición de variaciones muy pequeñas en las dimensiones de una estructura cuando se la somete a un esfuerzo. Las medidas de las deformaciones de las estructuras de aviones o proyectiles, por ejemplo, permite localizar los "puntos débiles" y de esta forma llegar a un compromiso satisfactorio entre máximo esfuerzo y mínimo peso. En la ingeniería de puentes y autopistas se sigue una técnica similar. Las bandas extensiométricas se pueden emplear también como transductores de presión, ya que la presión en el interior de una tubería o de cualquier recipiente cerrado produce una deformación y una variación de sus dimensiones.

Las bandas extensiométricas consisten básicamente en un hilo resistivo unido (pegado) a la estructura que quiere estudiarse. Las deformaciones de la estructura se comunican al hilo produciendo un alargamiento que disminuye su diámetro y por tanto aumenta su resistencia eléctrica. Esta resistencia se conecta a un circuito puente, de forma que la salida del puente es una medida de la deformación de la estructura. En las aplicaciones de la medida de presiones, las bandas extensiométricas van encerradas en una cápsula. El extremo de la cápsula consiste en un diafragma flexible que se expone al gas o al líquido cuya presión se trata de medir. El movimiento del diafragma, consecuencia de las variaciones de la presión, se acopla al hilo del extensiómetro, produciendo el correspondiente cambio en su resistencia eléctrica.

### *Transductores de humedad*

En su forma más simple, el transductor de humedad consiste en una substancia química absorbente depositada sobre una base aislante. Por ejemplo, puede estar formado por una capa de cloruro de litio depositada sobre una placa aislante de cristal o de plástico. Se conectan unos terminales para establecer contacto eléctrico con esta capa. Cuando la substancia química absorbe humedad del ambiente que la rodea, su resistencia eléctrica disminuye. Como en el caso de cualquier otro transductor "resistivo", el transductor de humedad puede conectarse a un puente. Las variaciones de humedad producirán variaciones en la tensión de salida del puente.

## SUMARIO

Los transductores se emplean para apreciar valores de cantidades no eléctricas, tales como la temperatura, la presión, el flujo de un líquido o gas, etc. Los transductores convierten cantidades no eléctricas en valores correspondientes de tensión, corriente, resistencia, capacitancia o inductancia. Por ejemplo, un transformador diferencial es un transductor sensible a una posición mecánica que proporciona una tensión de salida proporcional a la misma. Este tipo de transformador contiene dos bobinados secundarios

conectados en serie y en oposición. Cuando el núcleo móvil del transformador está centrado, las tensiones de los dos secundarios son iguales y se anulan. Cuando el núcleo se desplaza de su posición central, se inducen tensiones distintas en cada uno de los dos secundarios. La *diferencia* de estas tensiones es la tensión de salida (error) y representa la posición del núcleo. El transformador en *E* y el TDLV son transformadores diferenciales de forma especial.

Los termistores y los termómetros de resistencia son transductores de temperatura del tipo "resistivo". En ambos casos el valor óhmico de la resistencia varía con la temperatura. El termómetro resistivo consiste en una resistencia bobinada (níquel o platino) y el termistor está formado por óxidos de manganeso, cobalto o níquel.

Los pares termoelectrónicos son transductores de temperatura contruidos por medio de dos metales distintos. Las fotocélulas responden a las radiaciones emitidas por substancias calientes y funcionan como transductores de temperatura en corriente.

Los fuelles y los tubos de Bourdon son componentes que responden a variaciones de presión. Sus movimientos se transmiten al cursor de un potenciómetro o al núcleo de un transformador diferencial para llevar a cabo la conversión de presión en tensión.

El flujo de un gas o de un líquido puede controlarse por medio de una pequeña turbina que mueve un imán permanente en el interior de una tubería. La tensión de salida, proporcional al flujo, se extrae mediante una bobina colocada en las proximidades del imán rotario.

Las bandas extensiométricas y las substancias sensibles a la humedad son transductores "resistivos". Los primeros responden a las deformaciones y los segundos a la absorción de humedad del ambiente.

#### PREGUNTAS

1. Describir las variaciones que tienen lugar a la salida de un transformador diferencial cuando el núcleo se mueve desde un extremo al otro.
2. Describir la construcción de un transformador *E* y de un transformador TDLV.
3. Citar dos tipos de transductores sensibles a la temperatura.
4. Citar dos tipos de transductores sensibles a la presión.
5. Citar dos tipos de transductores que proporcionen una salida en forma de movimiento mecánico.
6. Citar dos tipos de transductores que proporcionen una salida en forma de variación de resistencia eléctrica.
7. Describir la construcción y el funcionamiento de un tubo de Bourdon trenzado.
8. ¿Cuál es la ventaja del empleo de un resorte para contrarrestar el movimiento en un fuelle?

## CAPITULO 4

### DETECTORES DEL ERROR: SINCRONOS

#### 4 - 1. Introducción

Aunque su tamaño es mayor que la mayoría de los otros tipos de detectores del error, el síncrono se emplea como componente detector del error por su alta sensibilidad y por tener una resolución prácticamente infinita. El síncrono, conocido a menudo con el nombre de *selsyn* (marca comercial de la General Electric Co.) combina el principio del motor eléctrico con el principio del transformador. Como motor, el síncrono tiene un bobinado fijo y bobinados montados sobre un rotor; como transformador, uno de los bobinados actúa como primario y el otro como secundario. Tanto el bobinado fijo como el móvil pueden usarse como primario: dependerá del tipo de síncrono y de la aplicación que quiera hacerse de él.

En el *sincrotransmisor* el rotor funciona como primario y los bobinados del estator hacen de secundarios. Como el ángulo que forman el bobinado del rotor con los del estator puede variarse moviendo el eje, el acoplamiento entre primario y secundario es variable. La tensión inducida en el secundario depende del ángulo girado por el eje del rotor. Por esta razón, el sincrotransmisor puede considerarse como un transductor de *posición a tensión*.

En el *sincrorreceptor*, los bobinados de estator generan un campo magnético cuya dirección y magnitud están determinadas por las tensiones aplicadas. De esta forma, el rotor girará hasta quedar alineado con el campo magnético del estator. El ángulo girado por el eje, unido al rotor, depende de las tensiones aplicadas a los bobinados del estator. Por esta razón, el sincrorreceptor puede considerarse como un transductor de *tensión a posición*.

#### 4 - 2. El sincrotransmisor

Como se indica en la figura 4-1, el sincrotransmisor cuenta con un bobinado en el rotor y tres bobinados, conectados en Y, en el estator. Estos tres bobinados del estator están situados a  $120^\circ$  y uno de los extremos de cada uno de ellos está conectado a un punto común. Este terminal común no es accesible desde el exterior, pero los tres extremos libres del bobinado del estator están conectados a terminales colocados en la carcasa del síncrono. Estos

terminales están indicados como  $S_1$ ,  $S_2$  y  $S_3$ . Los extremos del bobinado del rotor están también conectados a terminales exteriores y están señalados  $R_1$  y  $R_2$ .

Como se muestra en la figura 4-1, el bobinado del rotor está conectado a una fuente de excitación de tensión, y actúa como el primario de un transformador. Como los bobinados del estator se comportan como secundarios, y como la tensión inducida en ellos depende del ángulo con que las líneas de

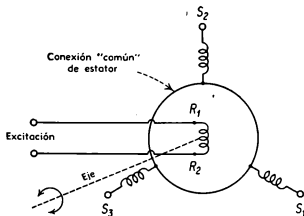
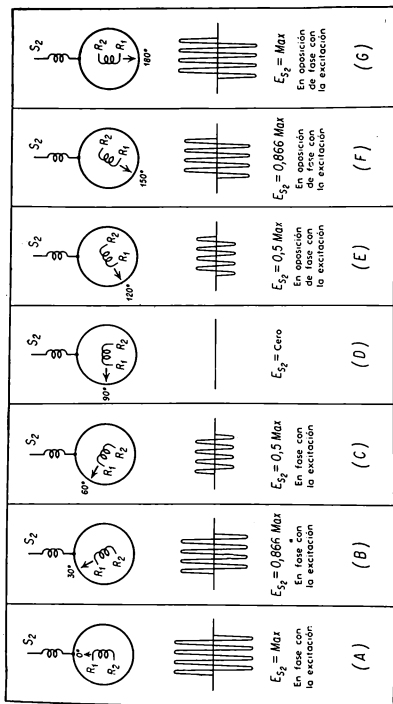


FIG. 4-1. El sincrotransmisor

fuerza magnéticas cortan sus espiras, las tensiones inducidas en los tres bobinados secundarios quedan determinadas por la posición física del rotor. La figura 4-2 ilustra la relación entre la posición del rotor y el valor de la tensión inducida en el bobinado  $S_2$  del estator. Para tener una referencia, la posición cero grado del rotor se define como la posición en la cual el bobinado del rotor está alineado con la bobina  $S_2$  del estator. En esta posición, el acoplamiento entre el primario (rotor) y el bobinado secundario  $S_2$  será máximo y la tensión inducida será también máxima. Esta situación se muestra en la figura 4-2 (A).

Si ahora se separa el rotor de la posición de cero grado, el acoplamiento con  $S_2$  disminuirá y la tensión inducida en  $S_2$  decrecerá asimismo. La tensión inducida varía de acuerdo con el coseno del ángulo girado por el eje. Con el rotor situado en los  $30^\circ$ , como se muestra en la figura 4-2 (B), la tensión inducida en  $S_2$  será solamente el 87 por ciento de la tensión inducida cuando el rotor estaba situado en  $0^\circ$  ( $\cos 30^\circ = 0,87$ ). Cuando el rotor esté situado en  $60^\circ$ , la tensión inducida en  $S_2$  será solamente el 50 por ciento de la tensión inducida en la posición de  $0^\circ$  ( $\cos 60^\circ = 0,5$ ). Cuando el rotor esté situado en los  $90^\circ$ , la tensión inducida será cero ( $\cos 90^\circ = 0$ ). Cuando se sobrepasan los  $90^\circ$ , el rotor empieza de nuevo a alinearse con  $S_2$  y la tensión inducida irá aumentando. Sin embargo, ha cruzado la posición horizontal, de forma

FIG. 4-2. Relaciones entre la tensión inducida en  $S_2$  y la posición del eje

que ahora  $R_2$  pasa a ser el extremo "alto" y  $R_1$  pasa a ser el extremo "bajo". La tensión inducida en  $S_2$  está ahora en oposición de fase con respecto a la tensión inducida cuando el ángulo girado por el rotor es menor de  $90^\circ$ . Cuando el ángulo girado por el rotor es de  $180^\circ$ , el rotor vuelve a alinearse con  $S_2$  y la tensión inducida es de nuevo máxima (pero está en oposición de fase con respecto a la tensión inducida en la posición de cero grado). Cuando el eje avanza desde  $180^\circ$  a  $270^\circ$ , la tensión inducida disminuye y desde los

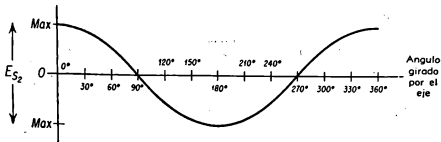


FIG. 4-3. Tensión inducida en  $S_2$  en función del ángulo girado por el eje

$270^\circ$  hasta los  $360^\circ$  la tensión aumenta nuevamente. En la figura 4-3 se muestra un gráfico del valor de la tensión inducida en función del ángulo girado por el eje.

La tensión inducida en  $S_2$  no identifica de una forma adecuada la posición del rotor. Por ejemplo, una tensión inducida de valor cero no indica si el ángulo girado por el eje es  $90^\circ$  o  $270^\circ$ . Asimismo, la tensión inducida es la misma para un giro de  $30^\circ$  que para un giro de  $330^\circ$ ; y también, para  $60^\circ$  y  $300^\circ$ ; etc., etc. Un devanado sólo en el estator proporciona una indicación ambigua de la posición del eje.

Como el síncrono tiene tres bobinados en el estator, situadas a  $120^\circ$ , el acoplamiento entre el primario y uno de ellos aumenta, mientras que el acoplamiento con el otro disminuye. Cuando el rotor se avanza desde cero hasta  $60^\circ$ , por ejemplo, el acoplamiento con  $S_2$  disminuye, pero el acoplamiento con  $S_1$  aumenta. La tensión inducida en  $S_1$  aumenta mientras la tensión en  $S_2$  disminuye. Como el terminal común de los bobinados del estator no es accesible desde el exterior, en la práctica se especifican las tensiones de salida del estator como tensiones entre terminales; es decir, de  $S_1$  a  $S_2$ , de  $S_1$  a  $S_3$  y de  $S_2$  a  $S_3$ . Las magnitudes de estas tensiones entre terminales están representadas gráficamente en la figura 4-4, en función del ángulo girado por el eje. Es importante tener en cuenta que estas curvas no representan las tensiones inducidas respecto al tiempo, sino que representan el valor eficaz de la tensión inducida en función del ángulo girado por el eje. La parte de las curvas por encima del eje horizontal corresponde a una tensión inducida *en fase* con la tensión de excitación, y la parte que está por debajo del eje horizontal corresponde a tensiones inducidas *en oposición de fase*

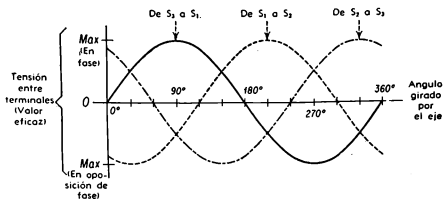


FIG. 4-4. Tensión entre terminales en función del ángulo girado por el eje

con respecto a la tensión de excitación. Por ejemplo, cuando el eje del rotor se encuentre en la posición correspondiente a los  $60^\circ$ , la tensión entre el terminal  $S_2$  y el  $S_3$  es cero, ya que las tensiones en estos dos bobinados se anulan debido a su conexión en serie. La tensión entre el terminal  $S_1$  y el  $S_3$  está próxima a un máximo y en fase con la excitación. La tensión entre los terminales  $S_1$  y  $S_2$  está también cerca de un máximo pero en oposición de fase con la excitación. Como se indica, las tres tensiones entre terminales identifican la posición angular del eje; es decir, no existen dos posiciones del eje que produzcan tres tensiones idénticas.

### Construcción

El estator del sincrotransmisor consiste en una estructura de hierro laminado con el bobinado colocado en unas ranuras como se muestra en la vista seccionada de la figura 4-5 (A). Las bobinas del estator están divididas

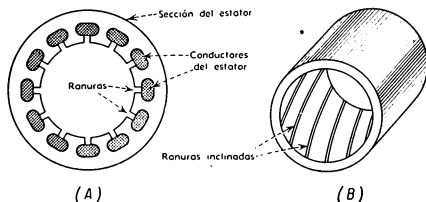


FIG. 4-5. Construcción del estator



eléctricamente en tres grupos separados  $120^\circ$ . Cuando se monta el laminado para formar el estator, cada ranura se gira ligeramente con respecto a la anterior y de esta forma se consigue que las ranuras no queden exactamente alineadas. La estructura presentará ranuras *inclinadas*; es decir, ranuras que no son paralelas al eje del rotor. Esta inclinación, que se ilustra en la figura 4-5 (B), distribuye el campo magnético de tal forma que el rotor no tiende a *quedarse parado* en una posición preferente respecto a las ranuras.

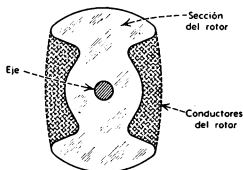


FIG. 4-6. Construcción del rotor

El bobinado del rotor se hace sobre una estructura laminada, como se muestra en la sección representada en la figura 4-6. Los extremos de las láminas del rotor se curvan para reducir todo lo posible el entrehierro entre rotor y estator. El eje del rotor trabaja sobre cojinetes de bolas para reducir las pérdidas por fricción. Un par de anillos conductores colocados sobre una porción aislada del eje y un par de escobillas aseguran el contacto eléctrico entre el bobinado del rotor y los terminales exteriores.

#### 4 - 3. El sincrorreceptor

El sincrotransmisor es un transductor de posición a tensión, en el cual la posición mecánica del rotor está representada por el conjunto de la tensiones entre terminales del estator. En contraste, el sincrorreceptor es un transductor de tensión en posición. Para un determinado valor de las tensiones aplicadas al bobinado del estator, el sincrorreceptor sitúa el rotor en la posición correspondiente. En la figura 4-7 se muestra un ejemplo. Tensiones procedentes de una fuente exterior se aplican a los terminales del estator. Los bobinados del estator originan un campo magnético cuya intensidad y dirección vienen determinadas por las tensiones aplicadas entre sus terminales. El rotor, conectado a una fuente de excitación, genera a su vez un campo magnético. De acuerdo con las polaridades magnéticas que se indican en la figura 4-7, el rotor girará en el sentido contrario al de las manecillas de un reloj. Estas polaridades magnéticas se señalan para un semiciclo de la señal aplicada.

Durante el semiciclo opuesto, las polaridades magnéticas se invierten y por tanto el rotor continúa girando en el sentido contrario al de las manecillas de un reloj. Las fuerzas de atracción y de repulsión magnéticas se producen de la misma forma que en un motor normal que funcionase con el estator como bobinado inductor y el rotor como armadura.

Además de la acción de motor descrita, tiene lugar una acción de transformador. El rotor, actuando como un primario, induce tensiones en los bobinados del estator. Estas tensiones inducidas dependen de la posición angular del rotor con respecto al estator. El rotor gira hasta que alcanza una posición en la cual las tensiones inducidas en los bobinados del estator anulan a las tensiones externas aplicadas al estator. En este momento, la

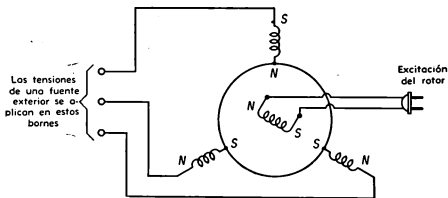


FIG. 4-7. Las polaridades magnéticas originan un giro del rotor contrario a las manecillas de un reloj

tensión resultante en los bobinados del estator es cero. Como la corriente del estator es también cero, el estator no genera flujo magnético y el rotor se detiene en esta posición. De esta forma, el rotor adquiere una posición determinada por las tensiones exteriores aplicadas al estator. Las curvas que se muestran en la figura 4-4 para el sincrotransmisor son aplicables también al receptor. El receptor detendrá su rotor en un ángulo, por ejemplo, de  $150^\circ$ , cuando las tensiones aplicadas a su estator sean:

De  $S_3$  a  $S_1$ : La mitad del valor máximo y en fase con la excitación del rotor.

De  $S_1$  a  $S_2$ : La mitad del valor máximo y en fase con la excitación del rotor.

De  $S_2$  a  $S_3$ : El valor máximo y  $180^\circ$  fuera de fase con la excitación del rotor.

Las tensiones exteriores aplicadas al estator a que se refiere la explicación anterior las proporciona normalmente un sincrotransmisor. El transmisor y el receptor se emplean en combinación, como se muestra en la figura 4-8.

El rotor del transmisor, actuando como primario, induce tensiones en los bobinados del estator. Estas tensiones del estator se aplican a los bobinados del estator del receptor. Los bobinados del estator del receptor originan un campo magnético que hace girar al rotor. El receptor gira como motor hasta que alcanza una posición angular equivalente a la del rotor del transmisor. En este momento, las tensiones inducidas en el estator del receptor son iguales, y, por tanto, anulan las tensiones inducidas en el estator del transmisor. Las corrientes del estator se anulan y el rotor detiene el giro. Si el rotor del

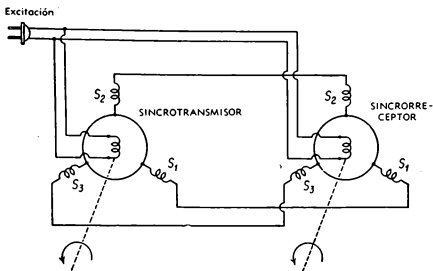


FIG. 4-8. El eje del receptor sigue el movimiento del eje del transmisor

transmisor se mueve a una posición angular diferente, el rotor del receptor se moverá hasta alcanzar la posición correspondiente. De esta forma, cualquier movimiento del rotor del transmisor es repetido por el rotor del receptor. La combinación de un transmisor y un receptor sincroniza el movimiento de dos ejes sin requerir ningún acoplamiento mecánico. Esta combinación es de gran utilidad en aplicaciones de control de posición a distancia (si la carga mecánica aplicada al receptor no es muy grande) y en aplicaciones de indicación a distancia (colocando una aguja en el eje del receptor que señalará la posición angular del eje del transmisor situado en un lugar alejado).

La estructura física del sincrorreceptor es similar a la del transmisor excepto en que el receptor lleva un amortiguador mecánico. Sin este amortiguador, el rotor del receptor se movería demasiado rápidamente. Giraría más allá de la posición correcta, invertiría el giro pasando de nuevo por su posición de equilibrio, volvería a invertir el giro nuevamente y seguiría oscilando. Esta "oscilación" ocurriría especialmente al aplicar tensión al sistema por primera vez y al tratar, el rotor del receptor, de alinearse con el rotor del transmisor.

También puede ocurrir que el rotor del receptor pasase de la posición correcta hasta llegar a una revolución completa. En estas condiciones el rotor del receptor "giraría" en forma continua como si fuese un verdadero motor.

#### 4 - 4. El sincrotransformador de control

Como consecuencia de tener un par relativamente limitado, el sincroreceptor se emplea solamente para mover cargas ligeras (por ejemplo, la aguja de un indicador de posición). Si se emplean grandes cargas, no solamente se sobrepasa la capacidad de arrastre del par del receptor, sino que además se reduce la precisión del sistema. Por estas razones, en las aplicaciones de los servomecanismos se emplea el *sincrotransformador de control* en vez del receptor.

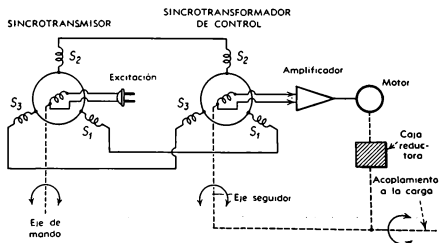


FIG. 4-9. Servomecanismo empleando sincros

tor. El transformador de control proporciona una señal de error cuya magnitud y fase representan la magnitud del error entre un eje de salida y un eje de entrada (mando). La disposición de estos componentes se muestra en la figura 4-9. El eje de mando (rotor del sincrotransmisor) se ajusta para representar la posición deseada de la carga (por ejemplo una antena). La carga se acopla mecánicamente al eje del transformador de control. Un error en la posición de la carga producirá un error en la posición del rotor del transformador de control; es decir, que el eje del transformador de control no corresponderá en posición con el eje de mando. En estas condiciones el transformador de control proporcionará una tensión del error. La tensión del error se amplifica y se emplea para gobernar un motor que colocará la carga en posición. Cuando la carga se aproxime a la posición deseada, el rotor del transformador de control se aproximará a la posición correspondiente a la del eje de mando. La tensión del error disminuirá, alcanzando el cero cuando

el ángulo del rotor del transformador de control sea igual al ángulo del eje de mando. La carga habrá alcanzado la posición deseada y el motor se detendrá.

De la misma forma que el estator del transmisor o del receptor, el estator del sincrotransformador de control está formado por tres bobinados conectados en  $Y$  y situados a  $120^\circ$ . Estos bobinados del estator se alimentan por tensiones procedentes de una fuente externa (sincrotransmisor) y la corriente que circula por ellos origina un campo magnético. La dirección de este campo magnético

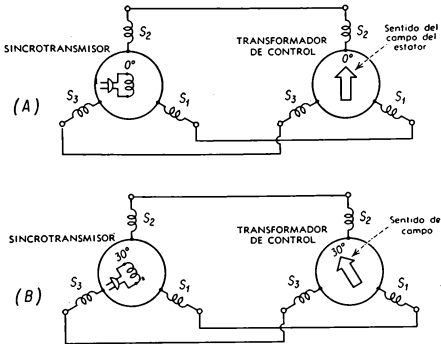


FIG. 4-10. El transmisor controla el sentido del campo del estator del transformador de control

depende de la magnitud y fase de las tensiones aplicadas a los terminales del estator. La dirección del campo magnético que se establece en el transformador de control depende de la posición del rotor del sincrotransmisor. En la figura 4-10 (A), el rotor del transmisor (y su campo magnético) se encuentra situado en los cero grados. En este instante, el campo magnético del transformador de control tiene la misma dirección ( $0^\circ$ ). En la figura 4-10 (B), el rotor del transmisor ha sido avanzado  $30^\circ$ . Con el rotor (primario) en este ángulo, las tensiones inducidas en el estator son diferentes a las que había anteriormente. Estas nuevas tensiones entre terminales, aplicadas al estator del transformador de control, generan un campo magnético en la dirección correspondiente a los  $30^\circ$ . De esta forma, la dirección del campo

magnético en el transformador de control puede cambiarse variando la posición del rotor del transmisor.

Como la tensión inducida en el rotor del transformador de control depende del ángulo con que sus espiras corten al campo magnético del estator, la tensión inducida en el rotor está determinada por: (1) la posición angular del rotor del transformador; (2) la dirección angular del campo magnético del estator. Esta posición angular del campo magnético del estator depende del ángulo del eje del transmisor. El resultado final es que la magnitud y fase de la tensión inducida en el rotor del transformador de control depende de la *diferencia* entre las posiciones angulares de dos ejes (transmisor y transformador de control).

El cero eléctrico ( $0^\circ$ ) del transformador de control se define como el ángulo del eje para el cual el rotor se encuentra perpendicular al bobinado  $S_2$  del estator, como se muestra en la figura 4-11. En este caso

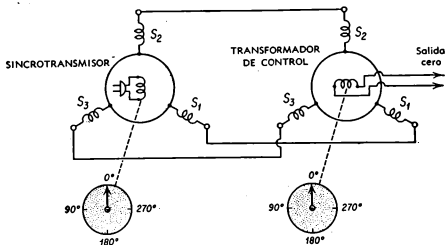


FIG. 4-11. Ejes del transmisor y del transformador de control situados en la posición correspondiente a los cero grados

ambos ejes están situados en cero grados. El campo magnético del estator del transformador está, por tanto, en la dirección correspondiente a los cero grados. Como las líneas de fuerza de este campo son paralelas al bobinado del motor, no habrá tensión inducida en el mismo. Si cualquiera de los ejes de la figura 4-11 se mueve, el campo del estator del transformador de control *cortará* el bobinado del rotor. En este caso aparecerá una tensión inducida en el rotor de acuerdo con la dirección en que las espiras sean cortadas por el campo magnético. Si la diferencia angular entre los dos ejes se aumenta hasta los  $90^\circ$ , el campo magnético del estator del transformador de control cortará a las espiras del rotor en ángulo recto. La tensión inducida en el rotor será máxima. Conviene hacer notar que quien determina el valor de la tensión

inducida en el transformador es el valor de la *diferencia* entre los ángulos, y no el valor absoluto de los mismos. La tensión inducida será máxima si los ejes están situados en  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , en  $10^\circ$  y  $100^\circ$ , en  $200^\circ$  y  $290^\circ$ , etc., etc.

Númericamente la tensión inducida en el rotor del transformador de control es igual al *seno* de la *diferencia* de ángulos, multiplicado por el valor máximo de la tensión inducida. Si la tensión inducida máxima vale, por ejemplo, 55 volt eficaces (cuando la diferencia de ángulos es de  $90^\circ$ ), la tensión inducida para una diferencia angular de  $30^\circ$  será:

$$\begin{aligned} E_{\text{inducida}} &= E_{\text{máxima}} (\text{sen } 30^\circ) \\ &= 55 (0,5) \\ &= 27,5 \text{ V eficaces} \end{aligned}$$

En la figura 4-12 se muestra un gráfico que representa el valor de la tensión inducida en función de la diferencia de ángulos.

La tensión inducida en el rotor del transformador de control puede estar *en fase* o  $180^\circ$  en *oposición de fase* con respecto a la excitación aplicada al rotor del transmisor. Ello depende de si el eje del transformador gira un

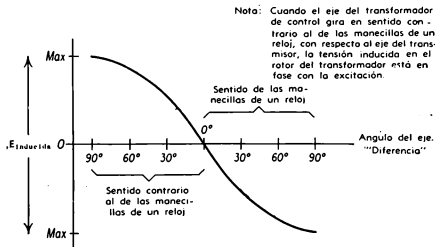


FIG. 4-12. Tensión inducida en el rotor de un transformador de control en función de la diferencia angular de los ejes

ángulo en adelante o en retraso con respecto al ángulo del eje del transmisor. Esto se ilustra en la figura 4-13. El ángulo del eje se considera que "aumenta" cuando gira en el sentido contrario al de las manecillas de un reloj (visto desde el extremo del eje del síncrono). El eje del transformador está *adelantado* con respecto al eje del transmisor en  $60^\circ$  en la figura 4-13 (A). La tensión inducida en el rotor del transformador es aproximadamente el

87 por ciento del valor eficaz máximo ( $\text{sen } 60^\circ = 0,87$ ) y está *en fase* con la tensión de excitación del rotor. En la figura 4-13 (B), el eje del transformador está *retrasado*  $60^\circ$  respecto al eje del transmisor. La tensión inducida en el rotor del transformador es ahora 0,87 del valor máximo, pero está  $180^\circ$  *fuera de fase* con la excitación del rotor del transmisor.

Cuando se emplea el transformador de control como componente de un servomecanismo, tal como en la figura 4-9, la diferencia angular entre el eje de mando y el eje seguidor se mantiene en valores pequeños debido a la acción

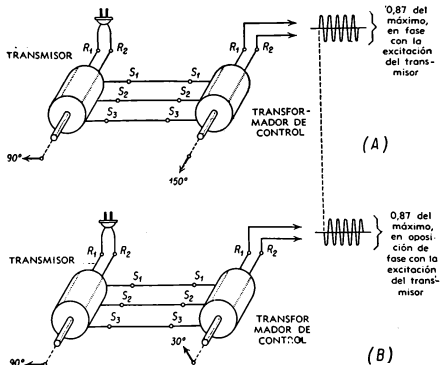


FIG. 4-13. La salida del transformador de control puede estar en fase o  $180^\circ$  en oposición de fase con la excitación del transmisor

correctiva del sistema. Para pequeños valores de la diferencia angular, la tensión del error varía prácticamente en forma lineal respecto a esta diferencia, como se muestra en la figura 4-12.

Cuando se conecta un sincrotransmisor a un transformador de control, como en la figura 4-11, hay dos posiciones del eje del transformador que corresponden a una tensión inducida nula en el rotor del transformador. Si los ejes del transmisor y del transformador están ambos en  $10^\circ$ , por ejemplo, los bobinados del rotor del transformador están paralelos al campo magnético y la tensión inducida es cero. Supongamos que el eje del transmisor se deja



en  $10^\circ$  y que el eje del transformador se gira  $180^\circ$ , hasta la posición correspondiente a los  $190^\circ$ . El bobinado del rotor del transformador estará de nuevo paralelo al campo magnético y la tensión inducida será también cero. El transformador de control tiene, por tanto, dos posiciones con *salida cero*, que están separadas  $180^\circ$ . Cuando el transformador de control se conecta como componente de un servomecanismo, como en la figura 4-9, la posición correcta de salida cero debe ser seleccionada (de otra forma el sistema tenderá a aumentar, en vez de a disminuir, el valor del error). Un método para seleccionar cuál de las dos posiciones de salida cero es la correcta es el siguiente:

1. Colocar el eje del transformador de control en una de las posiciones de salida cero.
2. Girar ligeramente el eje del transformador en sentido contrario al de las manecillas de un reloj.
3. Si la tensión de salida en el rotor del transformador está en fase con la excitación aplicada al rotor del transmisor, la posición seleccionada en 1 es correcta. (Si hubiese sido seleccionada una posición incorrecta en 1, el movimiento del eje en el sentido contrario a las manecillas de un reloj hubiese producido una señal de error  $180^\circ$  fuera de fase con la excitación del transmisor.)

#### 4 - 5. El sincrodiferencial

Como se explicó en la sección anterior, el transformador de control proporciona una tensión de salida (error) que depende de la diferencia entre

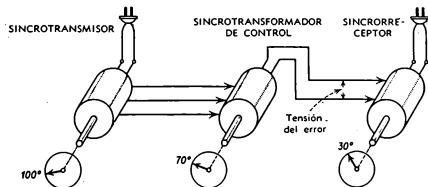


FIG. 4-14. El ángulo del receptor es igual a la diferencia entre los ángulos de los otros dos ejes

las posiciones angulares de dos ejes. Supongamos que esta tensión de error se aplica a un sincrorreceptor, como se indica en la figura 4-14. El eje del transmisor señala un ángulo de  $100^\circ$ , y el eje del transformador está

situado en los  $70^\circ$ . La señal de error producida por el transformador de control es una representación eléctrica del ángulo diferencia, cuyo valor es de  $30^\circ$ . Esta señal eléctrica, aplicada a la entrada del receptor, produce un campo magnético que sitúa al rotor del receptor en un ángulo de  $30^\circ$ . El eje del receptor, por tanto, toma una posición angular que representa la diferencia entre las posiciones angulares de los otros dos ejes. Esta disposición es útil en ciertos tipos de servomecanismos y en calculadores.

La figura 4-14 ilustra este procedimiento, pero en la práctica real no se conecta el transformador de control a un receptor. Los dos terminales del

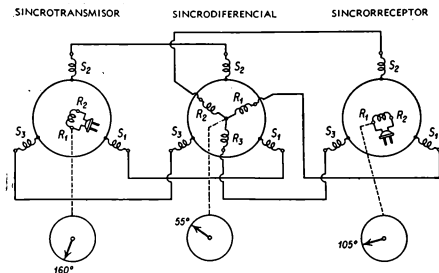


FIG. 4-15. Disposición práctica del principio ilustrado en la figura 4-14

rotor del transformador de control no pueden proporcionar las tensiones necesarias que hay que aplicar entre terminales del estator de un receptor. Esta dificultad puede resolverse modificando el rotor del transformador de control. El rotor puede estar formado por tres bobinados conectados en Y y espaciados  $120^\circ$ . Con este tipo de rotor, la unidad deja de ser un transformador de control y se convierte en un *sincrodiferencial*. En la figura 4-15 se muestra la disposición necesaria para realizar prácticamente el principio que se ilustra en la figura 4-14. Las tensiones inducidas en los tres bobinados del rotor del sincrodiferencial constituyen una representación eléctrica de la diferencia de ángulos entre los dos ejes de entrada (transmisor y diferencial). Estas tensiones equivalentes a una posición se aplican a los bobinados del estator del receptor, haciendo que el eje del receptor se sitúe en la posición correspondiente.

Las posiciones que toma el eje del receptor para distintas posiciones de los ejes del transmisor y del diferencial están tabuladas en la figura 4-16.

Todos los ángulos se especifican en el sentido contrario a las manecillas de un reloj con respecto al cero eléctrico ( $0^\circ$ ). En cada caso, el ángulo que señala el eje del receptor es igual al ángulo del eje del transmisor, *menos* el ángulo del eje del diferencial. Cuando el eje del transmisor señale un

| EJE DEL TRANSMISOR | EJE DEL DIFERENCIAL | EJE DEL RECEPTOR |
|--------------------|---------------------|------------------|
| $270^\circ$        | $260^\circ$         | $10^\circ$       |
| $195^\circ$        | $195^\circ$         | $0^\circ$        |
| $120^\circ$        | $125^\circ$         | $355^\circ$      |
| $45^\circ$         | $95^\circ$          | $310^\circ$      |

FIG. 4-16. Posiciones de los ejes del transmisor del diferencial y del receptor

ángulo de  $260^\circ$ , por ejemplo, el eje del receptor marcará un ángulo de  $270^\circ - 260^\circ = 10^\circ$ . Cuando los ejes del transmisor y del diferencial estén situados en  $45^\circ$  y  $95^\circ$  respectivamente, el eje del receptor marcará un ángulo de  $45^\circ - 95^\circ = -50^\circ$ . Este valor negativo del ángulo representa un desplazamiento, en el sentido de las manecillas de un reloj, de  $50^\circ$  a partir de los  $0^\circ$  como referencia, y por tanto equivale a un ángulo de  $310^\circ$ .

En algunas aplicaciones puede ser necesario obtener una posición del eje del receptor que represente la *suma*, en vez de la diferencia, entre los ángulos.

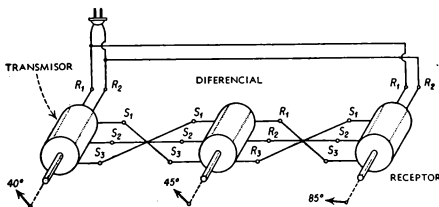


FIG. 4-17. Conexión para sumar los ángulos de entrada

girados por dos ejes. Esto puede realizarse invirtiendo las conexiones, como se muestra en la figura 4-17; esta inversión hace girar el campo magnético, situando el rotor del receptor en la posición correspondiente a la *suma* de ángulos.

Como se muestra en la figura 4-18, el sincrodiferencial se emplea a veces en unión de dos transmisores. Uno de los transmisores proporciona las tensiones entre terminales para el estator del diferencial y el otro las tensiones entre terminales para el rotor. En el diferencial, el campo magnético del estator reacciona con el campo magnético del rotor. Las fuerzas de atracción y repulsión magnéticas mueven al rotor a una posición angular que representa la diferencia de ángulos entre los ejes de los dos transmisores. El diferencial puede indicar la *suma* de ángulos, en vez de la diferencia, intercambiando las conexiones  $R_1$  y  $R_2$ .

Cuando el sincrodiferencial se usa para controlar un receptor, como en la figura 4-15, se denomina *sincrodiferencial transmisor*. Cuando el diferencial trabaja como una unidad controlada (receptor), como en la figura 4-18, se

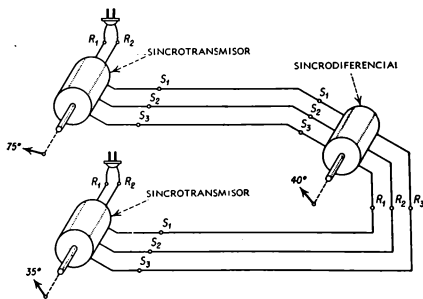


FIG. 4-18. Sincrodiferencial controlado por dos transmisores

denomina *sincrodiferencial receptor*. Físicamente, el diferencial transmisor y el diferencial receptor son similares, excepto que el receptor cuenta con un amortiguador de oscilación. En ambos tipos, el contacto eléctrico entre los bobinados del rotor y los terminales exteriores  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$  se establece por medio de anillos conductores y escobillas. El cero eléctrico ( $0^\circ$ ) del diferencial se define como la posición del eje en la cual quedan alineados el bobinado  $R_1$  del rotor y el  $S_1$  del estator, y, asimismo, los bobinados  $R_2$  y  $S_2$ , y los  $R_3$  y  $S_3$  respectivamente.

Como se indica en las figuras 4-15, 4-17 y 4-18, los sincros pueden conectarse de forma que las posiciones de un eje concuerden con la suma o diferencia de las posiciones de otros dos. En estas disposiciones, dos entradas

mecánicas (posiciones de los ejes) producen una posición mecánica (posición de un eje). En algunas aplicaciones de los servomecanismos se desea que dos entradas mecánicas proporcionen una salida eléctrica; es decir, una salida que sea una señal eléctrica (tensión de error), correspondiente a la suma o diferencia de las dos entradas mecánicas (posiciones de los ejes). Esto se puede conseguir sustituyendo el transformador de control por un sincroreceptor, como en la figura 4-15. La tensión inducida en el rotor del transformador de control puede conseguirse que represente la suma o la diferencia de los dos ángulos de los ejes de entrada (transmisor y diferencial) haciendo la conexión apropiada entre las unidades síncronas. La salida del transformador de control constituye una señal de error que puede amplificarse y emplearse para situar una carga en posición. La posición de la carga será función de la posición de *ambos* ejes de entrada. En los servomecanismos que se emplean para el movimiento de las piezas de artillería, por ejemplo, uno de los ejes de entrada puede ser controlado por un seguidor radar u óptico, y el otro eje de entrada puede representar el ángulo de deriva del blanco.

#### 4 - 6. Símbolos y dimensiones de los síncronos

Los sistemas síncronos se clasifican a menudo como sistemas de *par* o sistemas de *control*. Un sistema síncrono de par es aquel que proporciona una potencia mecánica suficiente para colocar en posición una carga ligera, tal como una esfera indicadora. Un sistema síncrono de control es el que se emplea para proporcionar una información eléctrica de algún otro dispositivo que sitúe en posición una carga, como por ejemplo un servomotor. En general, los sistemas de control son más exactos que los sistemas de par porque la carga mecánica de las unidades síncronas que se emplean es menor. Los síncronos pueden clasificarse haciendo esta distinción; por ejemplo, sincrotransmisores de par, transmisores de control, transmisor diferencial de control, etc., etc. A menudo se emplean letras para identificar los diferentes tipos, en la forma que se indica a continuación:

|     |   |                                   |
|-----|---|-----------------------------------|
| TX  | — | Transmisor de par                 |
| CX  | — | Transmisor de control             |
| TDX | — | Transmisor diferencial de par     |
| CDX | — | Transmisor diferencial de control |
| TR  | — | Receptor de par                   |
| TDR | — | Receptor diferencial de par       |
| CT  | — | Transformador de control          |

A veces aparecen algunas variaciones en el empleo de estas letras como consecuencia de que los transmisores y receptores se denominan *generadores* y *motores* síncronos respectivamente. Para identificar estas unidades se suelen emplear las letras "G" y "M": por ejemplo, "DG" significa "generador diferencial".

En los esquemas, los síncronos normalmente se representan por los símbolos que se muestran en la figura 4-19. Para especificar las características de cada tipo se suelen incluir en los diagramas las letras correspondientes a los terminales.

Los síncronos empleados en las fuerzas armadas tienen asignado un número tipo que indica sus dimensiones, el tipo de unidad y la frecuencia

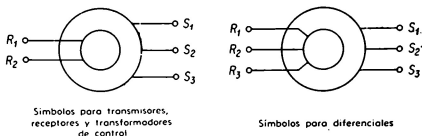


FIG. 4-19. Representación esquemática de un síncrono

de excitación. Ejemplos típicos de estos números tipos son: 15CX4, 18TR6, 23TDX6 y 11CT4. Las letras de esta nomenclatura indican la función de cada unidad de acuerdo con las letras de la designación anteriormente citada.

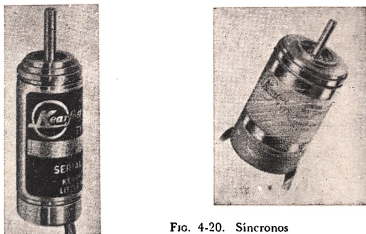


FIG. 4-20. Síncronos

Los números que preceden a las letras indican el diámetro del síncrono en décimas de pulgada, dando el valor redondeado a la décima más alta. El número que sigue a las letras indica la frecuencia de excitación de cada unidad: el 4 corresponde a 400 ciclos por segundo y el 6 a 600. Así, pues, el síncrono 11CT4 es un transformador de control para trabajar en 400 ciclos por segundo y con un diámetro de 1,1 pulgadas (2,82 centímetros). En la figura 4-20 se muestran unos tipos de síncronos típicos.

## SUMARIO

El transmisor síncrono funciona como un transformador variable. El bobinado del rotor actúa como un primario induciendo tensiones en los tres bobinados del estator (secundario) que están espaciadas  $120^\circ$ . Como la tensión inducida en el bobinado secundario está determinada por el ángulo con que el campo magnético del primario lo corta, el sincrotransmisor proporciona unas tensiones de salida (estator) que representan el ángulo de posición de su eje.

Las tensiones de salida del sincrotransmisor se aplican a los bobinados del estator de un receptor síncrono. En el receptor se establece un campo magnético y la dirección de este campo está determinada por el eje del transmisor. El eje del receptor se sitúa en la misma posición angular que el eje del transmisor. Como consecuencia de poder situar en una determinada posición el eje del receptor haciendo girar el eje de transmisor, la combinación transmisor-receptor puede emplearse para controlar una posición a distancia. Este sistema se denomina sistema de bajo par y solamente es útil para cargas ligeras.

En aplicaciones que requieran situar en posición cargas mayores se emplea un sincrotransformador de control en vez del sincrorreceptor. El transformador de control produce una señal de error determinada por la diferencia entre la posición angular de su eje y del eje de un sincrotransmisor. Esta señal de error se amplifica y es aplicada a un servomotor. El motor sitúa la carga en posición y al mismo tiempo hace girar al eje del transformador de control. Cuando este eje se encuentre en la misma posición angular del eje del transmisor, la tensión de error se reduce a cero y el motor se para.

Los sincrodiferenciales se emplean en aplicaciones que requieren que la carga sea colocada en una posición de acuerdo con la suma (o diferencia) de ángulo de dos ejes.

## PREGUNTAS

1. ¿En un sincrotransmisor, quién actúa como primario, el rotor o el estator?
2. Cuando el eje de un sincrotransmisor se encuentra en cero grado, ¿cuál es la posición del bobinado del rotor con respecto al del estator?
3. ¿Qué es un ranurado inclinado?
4. Supongamos que un sincrorreceptor está conectado a un sincrotransmisor y que ambos ejes tienen la misma posición angular. Explicar por qué no circula corriente por los bobinados de los estatores.

5. Cuando el eje de un transformador de control se encuentra en la posición de cero grado, ¿cuál es la posición del bobinado del rotor con respecto al del estator?
6. Explicar cuál es la función de un transformador de control.
7. Supongamos que un sincrotransmisor, un diferencial y un receptor se conectan en la forma que se indica en la figura 4-15. Si el eje del transmisor se encuentra en  $310^\circ$ , y el eje del diferencial en  $210^\circ$ , ¿qué ángulo marcará el eje del receptor?
8. Si en la figura 4-15 el eje del transmisor se encuentra en  $210^\circ$  y el eje del diferencial en  $310^\circ$ , ¿qué ángulo marcará el eje del receptor?



## CAPITULO 5

### CORRECTORES DEL ERROR

#### 5 - 1. Introducción

Cualquier método que se emplee para detectar los errores en un servomecanismo tiene por objeto final aplicar la señal de error a un dispositivo corrector del mismo. El corrector del error llevará la salida (carga) a una posición en correspondencia con la señal de mando de la entrada. Para realizar esto, el corrector del error debe ser capaz de proporcionar una potencia adecuada a la carga. Deberá tener una alta velocidad de respuesta (dentro de una oscilación mínima), y deberá ser reversible de forma que pueda corregir los errores en ambas direcciones. El *servomotor* satisface estas condiciones y es la forma más empleada como corrección del error. Se emplean servomotores de c.c. y de c.a.; se usará uno u otro según los requerimientos de la carga y de la fuente de alimentación disponible.

#### 5 - 2. Servomotores de c.c.

Un tipo de motor frecuentemente usado en servomecanismos es el motor de campo dividido. Como se muestra en la figura 5-1, este tipo de motor cuenta con dos bobinados inductores, o lo que es lo mismo, un bobinado inductor con toma central. Uno de los campos inductores tiende a hacer girar a la armadura en un sentido y el otro campo tiende a hacerla girar en sentido contrario. Como referencia, los dos sentidos de giro se denominan *directo* e *inverso* o en el *sentido contrario* y en el *mismo sentido* que las *manecillas de un reloj*, respectivamente. La armadura de un motor de campo dividido puede conectarse independientemente a una fuente de alimentación de c.c., como se muestra en la figura 5-1 (A), o puede conectarse a la fuente de alimentación a través del bobinado de campo, como en la figura 5-1 (B).

Los motores de campo dividido se diseñan para trabajar a bajos valores de corriente para poder ser controlados por válvulas electrónicas de vacío, como se muestra en la figura 5-2. Se dispone un control de equilibrio para compensar las pequeñas diferencias entre las corrientes de las dos válvulas y ajustarlas para que sean iguales. Cuando circula la misma corriente por los

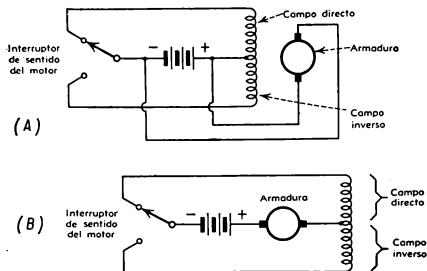


FIG. 5-1. Motor de campo dividido

dos bobinados, directo e inverso, el motor permanece estacionario. Si se aplica una tensión de error a la entrada del circuito, el motor girará a la velocidad y en la dirección correspondiente a la amplitud y polaridad de la tensión del error. Supongamos, por ejemplo, que la tensión de error es de tal polaridad que hace a la reja de  $V_1$  positiva y a la reja de  $V_2$  negativa. La corriente

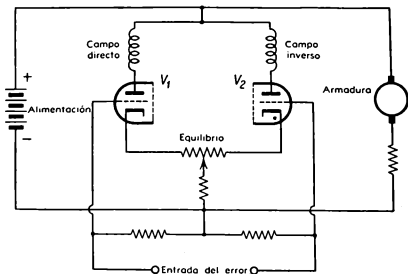


FIG. 5-2. Circuito de control con válvula electrónica para un motor de campo dividido

de placa de  $V_1$  aumentará mientras que la corriente de placa de  $V_2$  disminuirá. Como la corriente que circula por el devanado de campo directo del motor es mayor que la que circula por el de campo inverso, el motor girará en el sentido directo. La velocidad de rotación viene determinada por la diferencia entre las corrientes de placa de las dos válvulas. Una amplitud mayor de la señal del error producirá una mayor diferencia entre las corrientes de las dos válvulas, o lo que es lo mismo, una mayor diferencia entre el campo directo y el inverso, lo cual hará que el motor gire más rápidamente.

Si la tensión de error aplicada a los terminales de entrada de la figura 5-2 hubiese sido de polaridad opuesta, en relación a la descrita anteriormente,

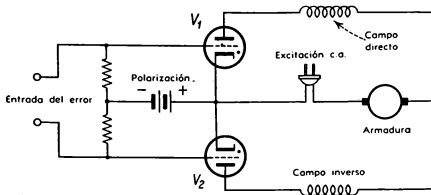


FIG. 5-3. Control con tiratrón de un motor de campo dividido

la corriente de placa de  $V_2$  habría sido mayor que la de  $V_1$ . En estas condiciones, la corriente que origina el campo inverso será mayor que la que origina el campo directo. De esta forma el motor girará en dirección inversa. La polaridad de la tensión del error determina, por tanto, la dirección en la cual el motor arrastra a la carga. El detector de error de este sistema debe estar diseñado de forma que la polaridad del error dependa del sentido en que ha sido desviada la carga respecto a la posición deseada.

En la figura 5-3 se ilustra el uso de tiratrones para controlar un motor de campo dividido. Como en el caso del circuito con válvulas de vacío, una de las válvulas suministra la corriente del campo directo y el otro la del campo inverso. Una diferencia importante es que la fuente de alimentación es de corriente alterna en lugar de continua. Las placas de los dos tiratrones son positivas durante un semiciclo de la tensión de alimentación y negativas durante el semiciclo opuesto. Cuando no hay señal de error aplicada al circuito, los tiratrones conducen igualmente durante los semiciclos positivos de la tensión de alimentación. De esta forma circulan corrientes iguales por ambos bobinados de campo y el motor no gira. Esta situación se muestra en la forma de ondas de la figura 5-4 (A).

Los tiratrones se ionizan durante los semiciclos positivos de la tensión de

alimentación en el instante en que la tensión de placa ha alcanzado el valor suficiente para contrarrestar el efecto de la polarización de rejilla. El valor de la tensión de placa que debe alcanzarse antes que el tiratrón se ionice depende del valor de la polarización, así como de las características del tiratrón. Si

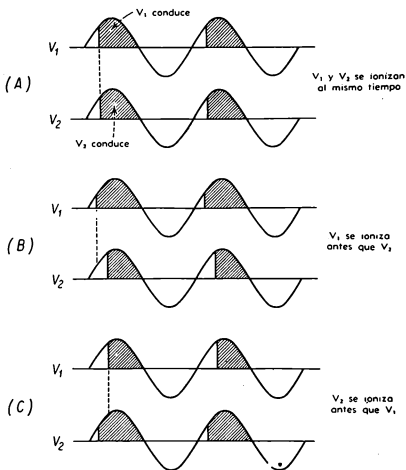


FIG. 5-4. Ionización de los tiratrones del circuito de la figura 5-3

la tensión de polarización es de  $-5$  volt y los tiratrones tienen una *relación de control* de 10, por ejemplo, la ionización ocurrirá cuando la tensión de placa alcance el valor de 50 volt, durante el semiciclo positivo. Si se aumenta la polarización a  $-6$  volt, los tiratrones no se ionizarán hasta que la tensión de placa haya alcanzado 60 volt. Los tiratrones podrán ionizarse *más pronto* o *más tarde*, durante el semiciclo positivo, según el valor de la tensión de polarización. Una vez que los tiratrones se han ionizado, permanecen en

esta condición durante el resto del semiciclo positivo de la tensión de alimentación. Esto se indica por el área rayada de las formas de onda de la figura 5-4.

Si ahora se aplica una tensión de error continua a los terminales de entrada (fig. 5-3), un tiratrón se ionizará antes que el otro. Supongamos, por ejemplo, que la polaridad de la tensión de error es positiva en la reja de  $V_1$  y negativa en la reja de  $V_2$ . Esta tensión de error reduce la polarización de  $V_1$  y aumenta la de  $V_2$ . El tiratrón  $V_1$  se ionizará, por tanto, antes durante las alternancias positivas, porque su tensión de placa no necesita alcanzar un valor tan alto, para sobrepasar el efecto de la polarización. Sin embargo, el tiratrón  $V_2$  se ionizará más tarde durante la alternancia positiva, ya que su tensión de placa deberá alcanzar un valor mucho más elevado para sobrepasar el efecto de la polarización. Esta condición se ilustra en las formas de onda de la figura 5-4 (B). Durante cada semiciclo positivo de la tensión de alimentación,  $V_1$  conduce durante más tiempo que  $V_2$ . Por tanto, el valor medio de la corriente que circula por el campo directo es mayor que el de la corriente que circula por el campo inverso.

Si la tensión de error hubiese sido de polaridad contraria (negativa en la reja de  $V_1$  y positiva en la reja de  $V_2$ ), la polarización de  $V_2$  sería menor que la de  $V_1$ . Por consiguiente, el tiratrón  $V_2$  se ionizaría antes que el  $V_1$ , como se muestra en la figura 5-4 (C). En estas condiciones  $V_2$  conduciría durante un tiempo mayor que  $V_1$ . El valor medio de la corriente del campo inverso sería mayor que el valor de la corriente del campo directo.

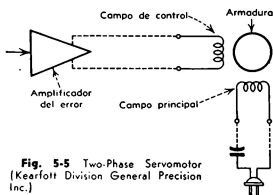
El circuito de la figura 5-3 puede funcionar también con una señal de error de fase reversible en c.a., como la producida por un sincrotransformador de control, un transformador  $E$ , un puente con potenciómetro excitado con c.a., etc. Esta señal de error se aplica, por medio de un transformador que tenga un secundario con punto medio reemplazando las dos mitades del secundario a las resistencias de reja de la figura 5-3. En este caso, si la tensión de error está en fase o  $180^\circ$  fuera de fase con la tensión de excitación, aparecerá un semiciclo de señal de error positivo en la reja de un tiratrón y un semiciclo negativo en la reja opuesta (durante el semiciclo positivo de la tensión de placa). Un tiratrón se disparará antes que el otro, produciendo corrientes distintas en los bobinados de campo del motor. El giro del motor restaura la condición de equilibrio del circuito y reduce a cero la señal de error. Sin señal de error, los tiratrones conducirán igualmente y el motor se detendrá.

### 5 - 3. Servomotores de c.a.

El motor de inducción de dos fases es tan empleado en los servomecanismos que ha llegado a ser un componente normalizado. Este motor, también denominado motor de fase partida, tiene dos bobinados de campo situados en ángulo recto, como se muestra en la figura 5-5. El campo principal, a veces denominado campo fijo o campo de referencia, se alimenta con la

excitación. El campo de control recibe su alimentación del amplificador del error. Cuando el servomecanismo se encuentra en condiciones de error nulo, el campo de control no recibe excitación y el motor no gira. Cuando aparece un error, su señal amplificadora se aplica al campo de control del motor. Como en estas condiciones los dos campos están excitados, el motor se pone en marcha. La velocidad y sentido de giro dependen de la amplitud y fase de la tensión de error.

Para que el motor funcione correctamente, es necesario que las dos corrientes de los campos estén desfasadas  $90^\circ$  entre sí. Estas corrientes originan un campo magnético giratorio que "arrastra" al rotor (armadura) del motor.



**Fig. 5-5** Two-Phase Servomotor  
(Kearfott Division General Precision Inc.)



**FIG. 5-5.** Servomotor de dos fases

El sentido de giro del campo magnético (y por tanto del rotor) depende de que la corriente del campo de control esté  $90^\circ$  por *delante* o por *detrás* de la corriente del campo principal.

En la figura 5-6 se muestra cómo dos corrientes desfasadas  $90^\circ$  dan origen a un campo magnético giratorio. En ella, dos pares de bobinas representan el campo principal y el de control de un motor. Como se indica por las formas de onda de la figura 5-6 (A), la corriente del campo de control está adelantada  $90^\circ$  respecto a la corriente del campo principal. En un instante, correspondiente a  $t_1$ , la corriente del campo de control es cero y la del campo principal es máxima. El campo magnético está, por tanto, en el sentido que señala la flecha en la figura 5-6 (B). Un instante después ( $t_2$ ), las corrientes del campo de control y del principal son iguales en amplitud pero de polaridades opuestas. Ambos campos producirán flujos magnéticos iguales, originando un campo compuesto como indica la flecha en la figura 5-6 (C). En el instante  $t_3$ , la corriente del campo de control es máxima y la del campo principal cero. El campo magnético estará en el sentido que se indica en la figura 5-6 (D). Más tarde, en el instante  $t_4$ , ambas corrientes serán iguales en amplitud y de la misma polaridad. El campo magnético compuesto estará en el sentido que se indica en la figura 5-6 (E).

No debe suponerse que el campo magnético gira a saltos. Realmente el giro es suave y continuo pasando por todas la posiciones intermedias que no se ilustran en la figura 5-6. En cualquier instante comprendido entre  $t_3$  y  $t_4$ , por ejemplo, el sentido del campo compuesto estará comprendido entre la flechas de la figuras 5-6 (D) y 5-6 (E). Después del instante  $t_4$  el campo compuesto continúa su giro en el sentido de las manecillas de un reloj.

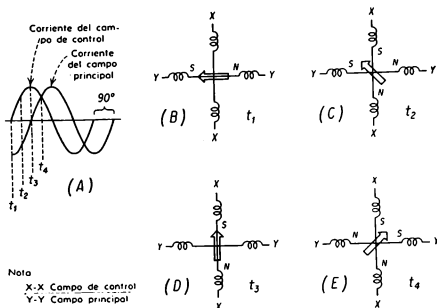


Fig. 5-6. Rotación del campo magnético en un servomotor de dos fases

Si la corriente del campo de control ha sido *retrasada* en vez de adelantada con respecto a la corriente del campo principal, el giro del campo magnético compuesto será contrario al de las manecillas de un reloj. Esto se ilustra en la figura 5-7, en la cual el sentido del campo magnético se muestra para distintos instantes de tiempo. Como el campo puede hacerse girar en cualesquiera de las dos direcciones, y como el campo "arrastra" al rotor con él, el motor de dos fases puede considerarse como un dispositivo sensible a la fase: el sentido de giro del motor puede cambiarse invirtiendo la fase de la tensión de excitación del campo de control.

El rotor o armadura de un motor de dos fases está formado por barras de cobre o de aluminio colocadas en las ranuras de un rotor laminado. Los extremos de las barras se conectan juntos por medio de anillos en ambos extremos del rotor. Como alternativa a este tipo de rotor de *jaula de ardilla*, puede emplearse un rotor bobinado con los extremos conectados en cortocircuito. En cualquiera de los dos casos, el campo magnético rotatorio cortará el bobinado de un rotor en cortocircuito. La corriente inducida en el rotor

da origen a un campo magnético. El rotor magnetizado tiende a alinearse con el campo magnético compuesto que originan los dos bobinados del motor. Como este campo magnético compuesto es giratorio, el rotor también girará. Realmente el rotor nunca puede "engancharse" con el campo magnético giratorio. En el instante que el rotor alcanza la posición que tiene el campo magnético rotatorio éste se ha desplazado a una nueva posición. La velocidad de giro del rotor es más lenta que la del campo rotatorio; la diferencia de

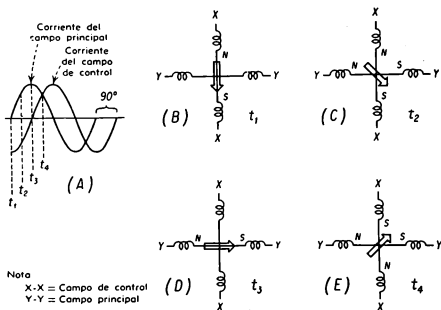


FIG. 5-7. Rotación del campo magnético en sentido contrario al de las manecillas de un reloj

estas velocidades se conoce con el nombre de *resbalamiento* del motor. El resbalamiento es una característica del servomotor de dos fases; no influye en absoluto en cuanto a deficiencia en el diseño. El rotor no puede girar a la misma velocidad que el campo, pues si ello ocurriese, no habría *corte* de líneas magnéticas. En estas condiciones no se induciría corriente en el rotor. El rotor quedaría desmagnetizado y se detendría.

El servomotor de dos fases se emplea normalmente en unión de un detector del error de fase reversible. Por ejemplo, un transformador diferencial, un sincrotransformador de control, un potenciómetro de puente excitado con c.a., etc. Estos detectores del error proporcionan una salida de c.a. en fase o desfasadas 180° con respecto a la tensión de excitación, según el sentido del error. Como la salida del amplificador de la tensión de error se aplica al campo de control del motor, el sentido de giro dependerá



del error. Esta característica permite al motor girar en el sentido conveniente para reducir el error a cero.

La diferencia de fase de  $90^\circ$  requerida entre las dos corrientes de campo del motor puede obtenerse de diferentes modos. Un procedimiento consiste en incluir un circuito inversor de fase en el amplificador del error, haciendo así que el campo de control del motor sea excitado  $90^\circ$  desfasado con respecto al campo principal. Otro procedimiento, que se emplea normalmente en la práctica, se ilustra en la figura 5-8 (A). En este caso se conecta un capacitor en serie con el campo principal del motor. El valor del capacitor

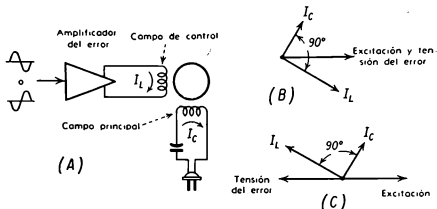


FIG. 5-8. Relaciones de fase en el servomotor de dos fases

se selecciona de forma que su reactancia capacitiva sea mayor que la reactancia inductiva del bobinado del campo principal del motor. La corriente que circula por el campo principal estará *adelantada* respecto a la tensión de excitación. Esta corriente adelantada se representa por el vector  $I_C$  en la figura 5-8 (B). Como el campo de control no tiene capacitor en serie, presenta una carga inductiva al amplificador del error. La corriente que circula por este campo está retrasada respecto a la tensión del error. Esta corriente retrasada está representada por el vector  $I_L$  en la figura 5-8 (B). Si el valor de la capacidad del circuito del campo principal ha sido seleccionado correctamente,  $I_L$  e  $I_C$  estarán desfasadas  $90^\circ$ .

El diagrama vectorial de la figura 5-8 (B) supone que la señal del error está *en fase* con la fuente de excitación. Este es el caso cuando la carga se desvía en un sentido respecto a la posición deseada. Si la carga se desvía en sentido opuesto, la señal de error estará  $180^\circ$  desfasada respecto a la excitación. Esta situación se ilustra en la figura 5-8 (C). En un caso, figura 5-8 (B), la corriente del campo de control está *retrasada*  $90^\circ$  respecto a la corriente del campo principal; en el otro caso, figura 5-8 (C), la corriente del campo de control está *adelantada*  $90^\circ$  respecto a la corriente del campo principal. El

sentido de giro del motor está determinado por el sentido en que se desvíe la carga de la posición deseada.

El amplificador del error puede acoplarse al campo de control del servomotor mediante un transformador, como se muestra en la figura 5-9 (A). Este transformador adapta la impedancia del campo de control a la impedancia de salida del amplificador. Puede emplearse una etapa simple de amplificación o una etapa en push-pull, según la potencia que se requiera.

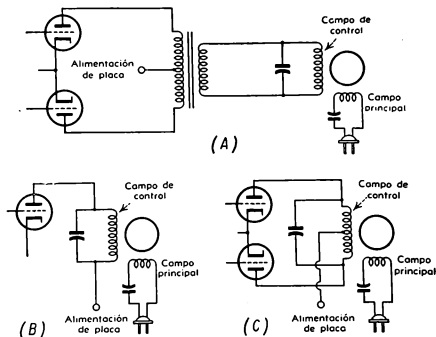


FIG. 5-9. Acoplamiento al campo de control

Cuando deben tenerse en consideración el peso y el espacio, el transformador de salida puede eliminarse, como se indica en la figura 5-9 (B) y en la 5-9 (C). En este caso el campo de control del motor se conecta directamente al circuito de placa de la etapa de salida del amplificador. El campo de control cuenta con el bobinado conveniente para adaptar la impedancia, y su aislamiento es el apropiado para soportar la tensión presente en el circuito de placa. Cuando el motor quiera usarse en un circuito con amplificador en push-pull debe conectarse una toma media en el bobinado del campo de control.

Como la corriente en la etapa de salida circula en impulsos (es decir, cada semiciclo), debe conectarse un capacitor en paralelo con el bobinado del campo de control. Este capacitor y el bobinado del campo de control forman

un circuito *tanque* y el "efecto de volante" restaura los semicírculos perdidos. Por tanto, la corriente que circula por el bobinado de control es senoidal.

Para poder reducir al mínimo el sobreimpulso y la oscilación en los servomecanismos es necesario emplear alguna forma de *amortiguamiento*. La unidad amortiguadora suele construirse en el interior del motor. Un tipo de amortiguador consiste en una rueda de paletas que gira en el interior de una cámara de aceite y que se encuentra acoplada al eje del rotor. Como las paletas deben girar "empujando" al aceite, el motor no puede hacer un movimiento rápido ni violento que es lo que produce la oscilación. También se emplean amortiguadores de fricción secos. Puede conseguirse un efecto similar por medio de amortiguadores de corriente de Foucault. Este tipo de amortiguador consiste en una pieza en forma de copa o de disco acoplado al eje del rotor. La copa está situada en el interior de un campo magnético fijo, debido a un imán permanente, pudiendo girar en su interior, induciéndose en ella corriente. Esta corriente inducida produce a su vez otro campo magnético de tal polaridad que se opone al giro de la copa. Como la intensidad de este campo magnético de frenado depende de la velocidad a que gira la copa, es decir, de la velocidad con que corta las líneas del campo magnético del imán permanente, la fuerza de retardo o *frenado* es proporcional a la velocidad del motor. Una variación de este tipo de amortiguador monta el imán permanente de forma que pueda girar. Cuando el motor está girando a velocidad constante la copa de frenado y el imán giran a la misma velocidad. Como la copa no *corta* líneas de fuerza no aparece campo de frenado. Si el motor intenta cambiar su velocidad repentinamente (o arrancar partiendo

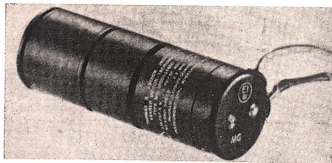


FIG. 5-10. Servomotor-generator

del reposo) la masa de inercia del imán no puede variar su velocidad tan rápidamente como la copa. Esta diferencia de velocidad hace posible que la copa *corte* las líneas de fuerza del campo del imán. En este caso la fuerza de retardo es proporcional a la aceleración del motor en lugar de serlo a la velocidad.

El efecto de un amortiguador mecánico puede simularse eléctricamente.

Una aproximación consiste en acoplar un generador al eje del rotor. La salida de este generador es proporcional a la velocidad del motor. La tensión del generador se acopla al amplificador del error con la polaridad conveniente para simular la fuerza de retardo de un amortiguador. El generador, conocido con el nombre de *generador tacométrico*, se construye a veces en el interior del servomotor, como se muestra en la figura 5-10.

#### 5 - 4. Motores incrementales

El motor incremental es un dispositivo *discontinuo* cuyo eje gira una cantidad fija cada vez que se le aplica un impulso. La posición del eje es función del número de impulsos aplicado. La amplitud del salto está fijada por el diseño del motor y puede ser desde una fracción de grado hasta una revolución completa. Pueden obtenerse saltos muy pequeños por medio de un tren de engranajes acoplado al eje del motor.

Los saltos se estabilizan por medio de un dispositivo mecánico o eléctrico; cada vez que se aplica un impulso el motor gira hasta la posición siguiente y se detiene en ella. Los sistemas de detección mecánicos emplean un linguete o un escape accionado por un solenoide. Los sistemas de detección eléctricos cuentan con un rotor dentado y una distribución del campo de forma que el motor se detiene en unas posiciones prefijadas.

Una ventaja del motor incremental sobre los motores de giro continuo es no requerir potencia durante los intervalos en que el error es cero. Por el contrario, uno de los campos del servomotor convencional de c.a. debe estar continuamente excitado, aun cuando no exista error en el sistema.

#### SUMARIO

Los servomotores se emplean en muchas ocasiones como correctores del error. El motor de campo dividido es un motor de c.c. que tiene dos bobinados opuestos que intentan hacer girar al motor en sentidos opuestos. Estos campos se conectan a los circuitos de placa de dos válvulas electrónicas. Una señal del error se aplica para controlar las polarizaciones de las dos válvulas, haciendo que una conduzca más que la otra y determinando el sentido de giro del motor.

El servomotor de c.a. (dos fases) tiene dos bobinados de campo situados a  $90^\circ$ . Cuando estos campos se excitan con corrientes desfasadas entre sí  $90^\circ$ , se establece un campo magnético giratorio. El rotor es cortado por este campo y la corriente en él inducida establece un campo magnético en el rotor. El rotor gira tratando de alinear su campo magnético con el campo giratorio originado por los dos bobinados del motor. Una inversión de fase de las corrientes en cualquiera de los dos campos invierte el sentido de giro del motor.

En el interior del servomotor se instala un sistema amortiguador para reducir al mínimo la oscilación y el sobreimpulso cuando el motor mueve la carga a la posición deseada. El amortiguamiento puede lograrse por medio de fricción o por medio de dispositivos de corrientes

## PREGUNTAS

1. Supóngase que se aplica una señal del error de c.a. al circuito de la figura 5-3: explicar por qué la tensión de alimentación de placa *debe* ser c.a. en vez de c.c.
2. ¿Cuál es la relación de fase necesaria entre la corriente del campo de control y la del campo principal en un servomotor de dos fases?
3. Describir la construcción de un rotor del tipo de jaula de ardilla.
4. Con relación a los motores de dos fases, ¿qué se entiende por *resbalamiento*?
5. ¿Cuál es el objeto del capacitor que se conecta normalmente en serie con el campo principal en un motor de dos fases?
6. ¿Cuál es el objeto del capacitor que se conecta normalmente en paralelo con el bobinado del campo de control en un motor de dos fases?
7. Explicar el funcionamiento de un amortiguador de corrientes inducidas.

## CAPITULO 6

### AMPLIFICADORES DEL ERROR: VALVULAS ELECTRONICAS DE VACIO

#### 6 - 1. Introducción

Los detectores del error son generalmente dispositivos de muy baja salida. Los valores de la salida de un detector del error están comprendidos en el margen de milivolt y a veces de microvolt. Sin embargo, los servomotores o las válvulas accionados por solenoides suelen requerir una potencia considerable para trabajar de una forma apropiada. Se necesita un amplificador para elevar la salida de bajo nivel del detector del error a un nivel de potencia suficientemente alto para poder excitar al corrector del error. Las características de los amplificadores del error son:

1. Suficiente ganancia de tensión determinada por la magnitud de la tensión del error y suficiente salida determinada por necesidades de potencia del corrector del error.

2. Una respuesta en frecuencia adecuada en el margen determinado por la frecuencia de excitación, el promedio de variación del mando de entrada y el promedio de variación del error.

3. Ser capaz de amplificar el tipo de señal que suministra el detector del error (c.a. o c.c.) y capaz de proporcionar el tipo de señal requerida por el corrector del error (c.a. o c.c.).

Para satisfacer el último de estos requerimientos, el amplificador del error puede incluir un vibrador (para convertir la señal del error de c.c. en c.a.), un desmodulador (para convertir c.a. en c.c.) para el corrector del error, o ambos dispositivos. El amplificador puede incluir también circuitos especiales para obtener las características en frecuencia que se deseen o para proporcionar un efecto de amortiguamiento.

#### 6 - 2. Amplificadores de c.c.

Los detectores del error que producen una salida en c.c. presentan un problema con respecto al diseño del amplificador. Como la señal del error puede variar muy lentamente o permanecer en el valor cero por largos

períodos de tiempo, será equivalente a una señal de muy baja frecuencia. Como los amplificadores de acoplamiento *RC* no son capaces de responder a frecuencias muy bajas, es necesario el empleo de amplificadores de c.c.

En el amplificador de acoplamiento directo que se muestra en la figura 6-1, la placa de cada etapa está acoplada resistivamente a la reja de la etapa siguiente. Como no existe capacitor de acoplamiento ni transformador, la placa de cada etapa tiende a hacer positiva la reja de la etapa siguiente. Esto puede evitarse conectando las rejass a una alimentación

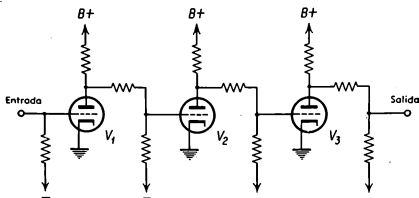


FIG. 6-1. Amplificador de acoplamiento directo

negativa que la mantiene a un potencial negativo respecto al cátodo. Sin embargo, el resistor de reja y el de acoplamiento forman un divisor de tensión que atenúa la señal. Para compensar esta pérdida, se puede aumentar el número de etapas de amplificación. Una de las desventajas más importantes de los amplificadores de acoplamiento directo es su tendencia al corrimiento. Las variaciones en la tensión de alimentación y las variaciones en los valores de los componentes producen variaciones en la tensión de salida del amplificador. Por ejemplo, una variación de la tensión de placa de  $V_1$  puede ser debido a una variación de la tensión de alimentación, o a un cambio en el valor de la resistencia de placa o de cátodo. El cambio de tensión en la placa de  $V_1$  origina una variación en la polarización de la reja de  $V_2$ , lo cual produce un cambio en la tensión de placa de  $V_2$  y a su vez en la reja de  $V_3$ , y así sucesivamente. Un pequeño cambio en la tensión en la primera etapa puede producir una gran variación en la tensión de salida del amplificador. Por consiguiente, la salida del amplificador no puede mantenerse en cero cuando no hay señal del error aplicada a la entrada. Como el amplificador es incapaz de distinguir cambios producidos por el error, o cambios producidos por la alimentación, o por variación de la temperatura, es importante disponer de una fuente de alimentación con una gran regulación y un circuito con componentes de muy alta estabilidad. Como consecuencia de ser muy crítico respecto a las variaciones de la tensión de alimentación y de la temperatura,

el amplificador de acoplamiento directo tiene un empleo limitado. Como variante puede emplearse el amplificador con vibrador. En este tipo de circuito, una señal del error de c.c. se convierte en una señal correspondiente de c.a. que permite el empleo de acoplamiento *RC* o de transformadores entre las etapas de amplificación.

### 6 - 3. Amplificadores con vibrador

El vibrador es un dispositivo electromecánico a veces denominado *modulador de contacto*. Una tensión sinusoidal se aplica a la bobina de mando del vibrador y hace que una lámina de metal vibre entre dos contactos fijos. Como se muestra en la figura 6-2, los contactos están conectados a los extremos del primario de un transformador. La tensión de entrada de c.c. (error) se aplica entre la lámina metálica y la toma central del transformador.

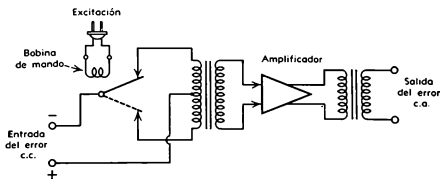


FIG. 6-2. Amplificador con vibrador

Cuando la lámina vibra conecta la tensión del error alternativamente a cada uno de los extremos del primario del transformador. Cuando la lámina metálica está en la posición alta de la figura 6-2, la tensión del error origina una corriente que *baja* por la mitad alta del bobinado del transformador. Un instante después, cuando la lámina esté en el contacto interior, la corriente subirá por la mitad inferior del primario del transformador. Esta inversión periódica de la dirección de la corriente en el primario del transformador da origen a una tensión alterna inducida en el secundario. La forma de onda del vibrador es esencialmente una onda cuadrada, como se indica en la figura 6-3. La amplitud y fase de la onda cuadrada depende de la amplitud y polaridad de la tensión continua del error. Como se muestra en la figura 6-3, una reducción de la tensión continua del error se traduce en una reducción de la amplitud de la onda cuadrada. Un cambio en la polaridad de la tensión continua del error produce un cambio de fase en la onda cuadrada. El tiempo que la lámina metálica del vibrador descansa en los contactos se conoce con



el nombre de tiempo de *reposo*. Durante el tiempo requerido por la lámina para ir de un contacto a otro, no circula corriente por el primario.

Una vez que la tensión del error continua ha sido convertida en una tensión alterna puede aplicarse a un amplificador convencional empleando

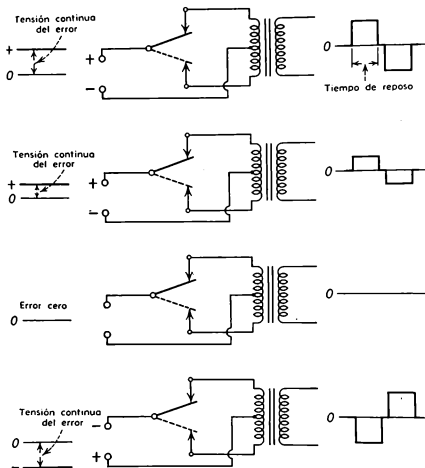


FIG. 6-3. Vibrador mecánico

acoplamiento por transformador o acoplamiento *RC*. La salida de c.a. del amplificador del error se aplica a un corrector del error; por ejemplo, el campo de control de un servomotor de c.a.

El amplificador con vibrador que se muestra en la figura 6-4 se emplea en el registrador Leeds and Northrup *Speedomax*. La tensión derivada de un potenciómetro conectado a una célula normalizada se aplica entre los



## LISTA DE COMPONENTES PARA LA FIG. 6-4

| ★ RESISTORES |          |     |               | CAPACITORES |               |         |              |
|--------------|----------|-----|---------------|-------------|---------------|---------|--------------|
| R1           | 20000    | 1W  | 011515        | C1          | 8 $\mu$ f     | 5% DC   | R-820-L      |
| R2           | 20000    |     | 11-4-0-95     | C2          | 8 $\mu$ f     | 5% DC   |              |
| R3           | 20000    |     | 11-4-0-95     | C3          | 8 $\mu$ f     | 5% DC   |              |
| R4           | 100000   |     | 11-1-0-56     | C4          | 50 $\mu$ f    | 25% DC  | Std. 2645-53 |
| R5           | 1.0 Meg  |     | 11-1-0-80     | C5          | 0.022 $\mu$ f | 400v DC | 23-3-0-70    |
| R6           | 1.0 Meg  |     | Std. 3246-166 | C6          | 50 $\mu$ f    | 25% DC  | Std. 2645-53 |
| R7           | 100000   |     | 11-1-0-56     | C7          | 50 $\mu$ f    | 25% DC  | Std. 2645-53 |
| R8           | 100000   |     | 11-1-0-56     | C8          | 0.022 $\mu$ f | 400v DC | 23-3-0-70    |
| R9           | 2.2 Meg. |     | 11-1-0-84     | C9          | 0.022 $\mu$ f | 400v DC | 23-3-0-70    |
| R10          | 1.0 Meg. |     | 11-1-0-80     | C10         | 50 $\mu$ f    | 25% DC  | Std. 2645-53 |
| R11          | 1.0 Meg. |     | 11-1-0-80     | C11         | 1.0 $\mu$ f   | 600v DC | R-820-K      |
| R12          | 1.0 Meg. |     | 11-1-0-80     | C12         | 0.5 $\mu$ f   | 600v DC |              |
| R13          | 1.0 Meg. |     | 11-1-0-80     | C13         | 4 $\mu$ f     | 450v DC | Std. 2645-52 |
| R14          | 100000   |     | 11-1-0-56     | C14         | 4 $\mu$ f     | 450v DC | Std. 2645-52 |
| R15          | 3900     | 2W  | 11-3-0-39     | C15         | 4 $\mu$ f     | 450v DC | Std. 2645-52 |
| R16          | 0.1 Meg. |     | 11-1-0-68     | C16         | 4 $\mu$ f     | 450v DC | Std. 2645-52 |
| R17          | 0.1 Meg. |     | 11-1-0-68     | C17-1       | 0.001 $\mu$ f | 023125  |              |
| R18          | 100000   | 1W  | 11-2-0-56     | C17-2       | 0.001 $\mu$ f |         |              |
| R19          | 1.0 Meg. |     | 11-1-0-80     | C18-1       | 0.001 $\mu$ f | 023125  |              |
| R20          | 3000     | 10W | 011059        | C18-2       | 0.001 $\mu$ f |         |              |
| R21          | 220000   | 2W  | 11-3-0-40     | C19-1       | 0.001 $\mu$ f | 023125  |              |
| R22          |          |     |               | C19-2       | 0.001 $\mu$ f |         |              |

★ Todos los resistores son de 1/2 Watt al 10 %, salvo especificación.

## MISCELÁNEAS

|    |                      |               |
|----|----------------------|---------------|
| V1 | 12AX7                | 22-1-0-6      |
| V2 | 12AX7                | 22-1-0-6      |
| V3 | 6L6                  | Std. 3246-178 |
| V4 | 6X4                  | 22-3-0-1      |
| X1 | Convertidor          | Std. 3338-1   |
| T1 | Transf. entrada      | Std. 21178-39 |
| T2 | Transf. alimentación | Std. 21178-40 |
| F1 | Fusible 3/16 Amp.    | 14-5-0-1      |

terminales 2 y 3 del conector de entrada. La tensión de entrada que va a medirse y a registrarse (procedente de un par termoelectrico por ejemplo) se aplica entre los terminales 4 y 5 del mismo conector. A estos terminales se conecta un filtro pasabajos para eliminar las interferencias presentes entre los conductores y en los cables del par termoelectrico.

Cuando el circuito está equilibrado, la tensión del potenciómetro (terminales 2 y 3) anula exactamente la tensión del par termoelectrico (terminales 4 y 5) y no hay entrada en el vibrador. Cuando no existe equilibrio se produce una tensión de error que queda aplicada entre la lámina metálica del vibrador y la toma central del transformador de entrada. La señal de c.a. que resulta se amplifica y se emplea para excitar el campo de control de un servomotor de dos fases. Este campo se conecta entre los terminales 2 y 3 del conector de salida y corresponde al circuito de placa del tubo  $V_3$ . El servomotor está acoplado mecánicamente al puntero de un indicador, que cuenta con una pluma que escribe sobre una tira de papel arrastrada por un motor, y al potenciómetro de equilibrio que restaura el circuito a la posición de reposo. La sensibilidad del circuito se ajusta por medio de un control de ganancia

( $R_6$ ) en el circuito de rejilla de  $V_2$ . Este control se ajusta para eliminar la oscilación. El transformador de potencia  $T_2$  suministra la potencia de entrada para la bobina del vibrador y para el rectificador de onda completa ( $V_4$ ) que proporciona la tensión  $B$  del amplificador.

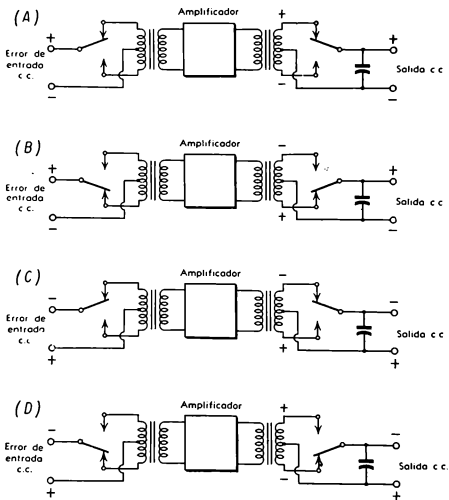


FIG. 6-5. Vibrador y desmodulador

Quando se emplea un amplificador con vibrador para alimentar un corrector del error del tipo de c.c., es necesario emplear un desmodulador para cambiar la señal del error en c.a. amplificada, en una señal del error en c.c. Puede emplearse otro vibrador (o también otro conjunto de lámina y contactos en el mismo vibrador) para obtener la desmodulación. Como se

muestra en la figura 6-5, los contactos fijos del desmodulador se conectan a los extremos opuestos del secundario del transformador de salida. La bobina del vibrador de salida está alimentada por la misma fuente que la bobina del vibrador de entrada (o ambas láminas metálicas son accionadas por una misma bobina). Las dos láminas se mueven en sincronismo. Como la lámina del desmodulador se mueve a la misma velocidad con que cambia de polaridad la tensión alterna del error (determinada por la velocidad a que se mueve la lámina del vibrador de entrada), aparece una tensión continua en la lámina del desmodulador. Cuando el extremo superior del bobinado secundario es positivo, como en la figura 6-5 (A), la lámina del desmodulador está en el contacto superior. Durante el semiciclo opuesto de la tensión del error del vibrador, el extremo inferior del secundario es positivo, como se indica en la figura 6-5 (B). En este momento la lámina del desmodulador está en el contacto inferior y mantiene, por tanto, un potencial positivo. El capacitor conectado a la lámina del desmodulador actúa como un filtro que aplanará las variaciones de tensión (de otra forma, la tensión de salida decrecería a cero durante el tiempo que tarda la lámina del desmodulador en trasladarse de un contacto a otro). La tensión en bornes de este capacitor de filtro es una tensión amplificada, correspondiente a la tensión del error continua aplicada a la entrada del vibrador. Cuando la tensión del error de entrada varía, la tensión de salida en bornes del capacitor de filtro varía en la misma forma. Si la tensión del error a la entrada invierte su polaridad (cuando la carga se desvía en una dirección opuesta de la posición deseada), la tensión de salida en bornes del capacitor de filtro invierte también su polaridad. Esto se ilustra en las figuras 6-5 (C) y 6-5 (D). Así pues, la lámina metálica del desmodulador llega a cada contacto en el instante en que el extremo correspondiente del bobinado secundario es negativo. La tensión de salida, como la tensión de entrada del error, es de polaridad negativa.

#### *Moduladores y desmoduladores electrónicos*

Las funciones de modular y desmodular pueden llevarse a cabo por medio de circuitos puramente electrónicos. Estos circuitos no contienen partes móviles como en el caso de un vibrador. Su tiempo de vida es mayor. Sin embargo, el nivel de ruido es generalmente más alto.

En la figura 6-6 se muestra un vibrador o modulador electrónico. Durante el semiciclo de la tensión de excitación correspondiente a la polaridad que se muestra en el transformador, ambos diodos conducen. Suponiendo que los diodos tengan una resistencia equivalente de conducción, el punto A se encuentra al mismo potencial que la toma central del transformador (tierra). Durante el semiciclo opuesto de la tensión de excitación, los diodos se encuentran polarizados inversamente y no conducen. El punto A queda desconectado del transformador y se encuentra al mismo potencial que el terminal de entrada (la tensión del error c.e. aplicada). De esta forma, el punto A varía alternativamente entre dos niveles de tensión: tierra y la tensión

continua del error. Como el punto *A* es el terminal de salida, la tensión de salida será una onda cuadrada a la frecuencia de la tensión de excitación, con una amplitud correspondiente a la excursión desde tierra hasta el valor de la tensión continua del error. Si el error cambia de magnitud, la onda cuadrada de salida variará correspondientemente. Si la tensión continua del error invierte su polaridad, la onda cuadrada de salida se extenderá desde

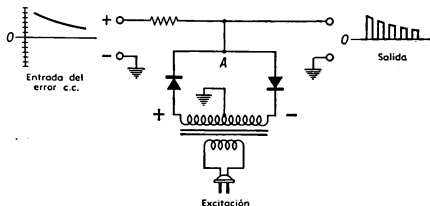


FIG. 6-6. Vibrador electrónico

tierra hasta un nivel negativo igual a la tensión continua del error. La tensión de excitación deberá ser mayor en amplitud que la tensión continua del error, de forma que la tensión del error no sobrepase el valor de polarización de los diodos.

Otro tipo de vibrador electrónico, denominado a veces modulador en anillo, es el que se muestra en la figura 6-7. Durante el semiciclo de excitación correspondiente a la polaridad que se indica en la figura, conducen los diodos  $D_1$  y  $D_2$ . El punto *A* se encuentra al mismo potencial que la toma central del transformador  $T_1$  (tensión del error). La tensión continua del error queda conectada al punto *A* y al extremo superior del transformador  $T_2$ . Durante el semiciclo opuesto de la tensión de excitación, los diodos  $D_3$  y  $D_4$  conducen. El punto *B* se encuentra al mismo potencial que la toma central del transformador  $T_1$ . En este instante, la entrada del error c.c. queda conectada al extremo inferior del transformador  $T_2$ . De esta forma, la entrada del error c.c. se transfiere alternativamente entre los extremos superior e inferior del transformador  $T_2$  (como en el caso de una lámina metálica vibrante que hiciera la conmutación). La tensión del secundario de  $T_2$  es una señal de c.a. correspondiente al error de entrada c.c.

Un desmodulador electrónico se muestra en la figura 6-8. Los circuitos de este tipo se conocen también con el nombre de *detectores sensibles a la fase*, debido a que la polaridad de la tensión continua de salida depende de la fase de la señal de entrada (error). En la figura 6-8 (*A*), ambos diodos conducen

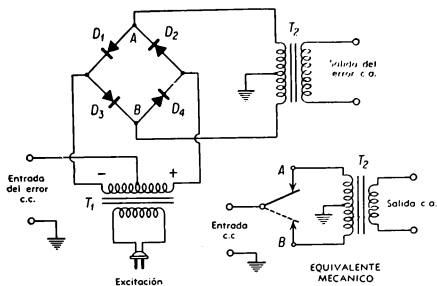


FIG. 6-7. El modulador de anillo

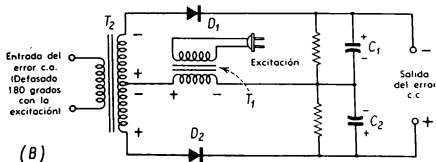
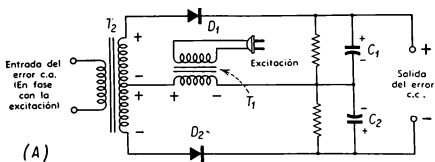


FIG. 6-8. Detector sensible a la fase

durante el semiciclo de la tensión de excitación correspondiente a la polaridad que se indica en la misma figura. Sin embargo, los diodos no conducen igualmente como consecuencia de la tensión alterna del error aplicada al transformador  $T_2$ . Cuando la tensión inducida en el secundario de este transformador tiene la polaridad que se indica en la figura, la tensión en el extremo superior del secundario se suma a la tensión del secundario de  $T_1$ .

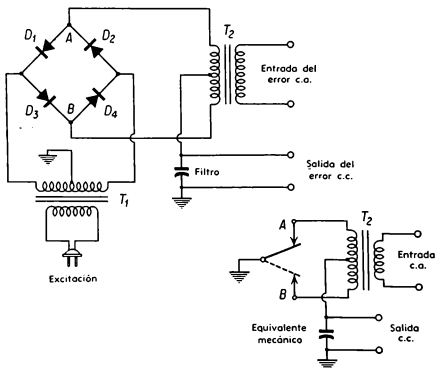


FIG. 6-9. El desmodulador de anillo

La tensión en el extremo inferior del secundario se resta de la tensión en el secundario de  $T_1$ . Por tanto, el diodo  $D_1$  conduce más corriente que el diodo  $D_2$ . Se acumula una carga mayor en el capacitor  $C_1$  que en el  $C_2$ . Como la tensión continua de salida es igual a la diferencia de estas cargas, la polaridad de la salida es la que se muestra en la figura 6-8 (A).

Si la tensión alterna del error aplicada al transformador  $T_2$  hubiese sido de fase opuesta, como se muestra en la figura 6-8 (B), el diodo  $D_2$  conduciría más corriente que el diodo  $D_1$ . Como consecuencia de ello el capacitor  $C_2$  tendría más carga que el  $C_1$ . La tensión continua de salida sería de polaridad opuesta, comparada con la de la figura 6-8 (A).

Durante los semiciclos de excitación en que la polaridad del transformador  $T_1$  es opuesta a la que se indica en la figura 6-8 (A) y 6-8 (B),



ninguno de los dos diodos conduce. Los capacitores  $C_1$  y  $C_2$  actúan como filtros, manteniendo la tensión continua de salida prácticamente constante durante la duración de estos semiciclos. La tensión de excitación en el secundario del transformador  $T_1$  deberá ser de mayor amplitud que la tensión inducida en las mitades del transformador  $T_2$ . Si esto no ocurriese, uno de los diodos conduciría durante el semiciclo de la excitación en que la polaridad de  $T_1$  fuese opuesta a la que se indica en la figura 6-8. Esta conducción alteraría la carga de uno de los capacitores y la diferencia de cargas no sería una representación exacta del valor del error.

En el circuito del desmodulador que se muestra en la figura 6-9, los diodos  $D_1$  y  $D_2$  conducen durante un semiciclo de la excitación y los diodos  $D_3$  y  $D_4$  conducen durante el semiciclo opuesto. Cuando la polaridad de  $T_1$  es tal que conducen los diodos  $D_1$  y  $D_2$ , el punto  $A$  está al mismo potencial que la toma central del transformador  $T_1$  (tierra). Cuando se invierte la polaridad de  $T_1$ , los diodos  $D_3$  y  $D_4$  conducen y el punto  $B$  se encuentra a potencial de tierra. Los extremos superior e inferior del secundario del transformador  $T_2$  están alternativamente a potencial de tierra. Por esta razón, se establece una carga de c.c. en el capacitor de filtro, aunque la entrada de  $T_2$  sea de c.a.

#### 6 - 4. Amplificadores de c.a.

Los servomecanismos que emplean un detector del error que produce una salida en c.a. y un corrector del error que requiere c.a. no necesitan moduladores ni desmoduladores. La señal de c.a. procedente del detector del error se aplica a un amplificador acoplado por transformador o por  $RC$ , donde es amplificada al nivel necesario para excitar al corrector del error. Un circuito

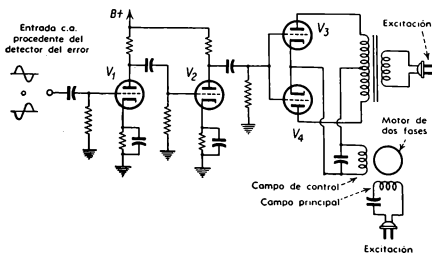


FIG. 6-10. Amplificador del error de c.a.

representativo de este tipo de servomecanismo es el que se muestra en la figura 6-10. La salida de un detector del error excitado por corriente alterna se acopla a la reja de  $V_1$ . La señal del error c.a. puede estar en fase a  $180^\circ$  fuera de fase con respecto a la tensión de excitación, según el sentido del error en el servomecanismo. Después de dos etapas de amplificación acopladas

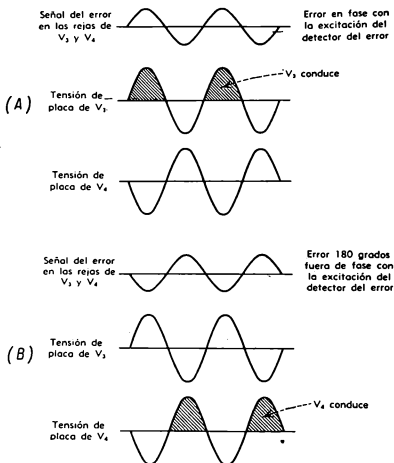


FIG. 6-11. Formas de onda del circuito de la figura 6-10

$RC$  ( $V_1$  y  $V_2$ ), la señal del error se aplica a las rejillas de  $V_3$  y  $V_4$ . Las válvulas  $V_3$  y  $V_4$  trabajan con tensión alterna en sus placas. Como las placas están conectadas a los extremos opuestos del transformador de excitación, estarán alimentados con tensiones desfasadas entre sí  $180^\circ$ ; es decir, la placa de  $V_1$  es positiva cuando la placa de  $V_2$  es negativa y viceversa. Por esta razón, sólo puede ser positiva una de las dos placas durante la alternancia positiva de la señal aplicada a la reja (error).

En la figura 6-11 (A), la fase de la señal del error es tal, que aparece una alternancia positiva en las rejillas de  $V_3$  y de  $V_4$  durante el semiciclo en que la placa de  $V_3$  es positiva.  $V_3$  conduce por tener su placa y rejilla ambas positivas.  $V_4$  no puede conducir por tener su placa negativa. Al semiciclo siguiente la alternancia negativa de la señal del error aparece en ambas rejillas y ni  $V_3$  ni  $V_4$  pueden conducir. Por tanto,  $V_3$  conduce solamente si la señal del error está en fase con la excitación y solamente durante los semiciclos positivos de la tensión de alimentación de placa.

Si la señal del error hubiese estado  $180^\circ$  fuera de fase con la excitación,  $V_4$  conduciría, en vez de hacerlo el  $V_3$ . Esto se indica en la figura 6-11 (B). En este caso la placa de  $V_4$  es positiva durante la alternancia positiva de la señal del error aplicada a las rejillas. El campo de control del servomotor de dos fases (fig. 6-10) es excitado por la corriente de placa de  $V_3$  o de  $V_4$  (aquella válvula que conduzca). Como las tensiones de placa están  $180^\circ$  fuera de fase una respecto a otra, el campo de control del motor se excitará  $90^\circ$  en adelante o  $90^\circ$  grados en retraso con respecto al campo principal. El sentido de giro del motor depende de la fase de la señal del error. El capacitor conectado en paralelo con el campo de control actúa como "volante" para restaurar los semiciclos perdidos. La corriente del campo de control es por tanto senoidal en vez de media onda.

### SUMARIO

El servoamplificador debe tener suficiente ganancia para poder responder a la señal de bajo nivel procedente del detector del error y debe ser capaz de proporcionar potencia suficiente para arrastrar al motor del corrector del error.

Las etapas de amplificación de acoplamiento directo pueden emplearse en unión de un detector del error que produce una salida en c.c. Sin embargo, estos amplificadores tienden a ser inestables con respecto a la temperatura y a las variaciones de la tensión de alimentación. Por esta razón, se emplean frecuentemente amplificadores con vibrador. El vibrador convierte una señal del error c.c. en una señal c.a., permitiendo el empleo de etapas de amplificación con acoplamiento RC o por transformador.

Si la señal del error es c.a., y si el detector del error es del tipo que requiere una excitación c.c., la señal del error amplificada debe de cambiarse de nuevo a c.c. Para este objeto se emplea un desmodulador. Los vibradores y desmoduladores pueden ser mecánicos (lámina vibrante) o electrónicos.

### PREGUNTAS

1. ¿Qué se entiende por *corrimiento* en un amplificador de acoplamiento directo?
2. Citar dos causas de corrimiento.

3. ¿Cuál es el objeto de un vibrador?
4. ¿Qué significa tiempo de reposo?
5. Explicar el objeto y el funcionamiento de un desmodulador de lámina vibrante.
6. ¿La salida de un detector sensible a la fase es c.c. o c.a.?
7. ¿Qué cambio tiene lugar en la salida de un detector sensible a la fase cuando la señal de entrada se invierte de fase?
8. Con referencia a la figura 6-10 explicar cómo invierte la dirección el servomotor cuando la señal del error se invierte de fase.

**AMPLIFICADORES DEL ERROR: EL TRANSISTOR****7 - 1. El transistor: fundamentos**

En servomecanismos, lo mismo que en cualquier otro tipo de dispositivo electrónico, el transistor ofrece la ventaja de su menor tamaño, su pequeño peso, su bajo consumo de potencia y su larga vida. Los amplificadores con transistores se emplean con preferencia a los de válvulas de vacío, especialmente cuando debe tenerse en consideración el peso y el tamaño.

El transistor es un dispositivo semiconductor (germanio o silicio) en el cual la corriente de salida se controla mediante una corriente de entrada. El germanio puro (o el silicio) no se emplea en transistores. Por el contrario, se añaden *impurezas* formadas por otros componentes químicos para obtener semiconductores del tipo *N* y del tipo *P*. En un semiconductor tipo *N*, parte de los electrones se encuentran en libertad para moverse fuera de las órbitas y pueden actuar como *portadores* de la corriente eléctrica. En un semiconductor tipo *P*, la estructura atómica está incompleta y existen huecos en algunas de sus órbitas. Estos huecos se conocen con el nombre de lagunas y un electrón puede moverse en el seno de un semiconductor tipo *P* trasladándose de una laguna a otra (de la misma forma que una persona atraviesa un auditorio lleno de gente tomando asiento en una butaca libre de la última fila y progresando gradualmente hacia adelante a medida que va ocupando los asientos vacíos que dejan libres las personas que van abandonando el auditorio). Aunque en principio parezca que las condiciones son las mismas, en la realidad un electrón puede moverse más rápidamente en un cristal *N* que en un cristal *P*. En el semiconductor tipo *P* el electrón no puede moverse hasta que aparezca en sus proximidades una laguna debido a que otro electrón se ha movido (de la misma forma que en el auditorio, la persona que intenta cruzarlo, no puede moverse mientras otra persona no decida salir fuera). En el transistor se emplea el mismo tipo de semiconductor para el emisor que para el colector y el tipo contrario para la base. Por ejemplo, en el transistor *NPN*, el emisor y el colector son tipo *N* y la base es tipo *P*. En el transistor *PNP*, el emisor y el colector son semiconductores tipo *P* y la base es tipo *N*. Como se indica en la figura 7-1, el circuito del colector está polarizado

inversamente: el colector tipo *N* está conectado al terminal positivo de la alimentación. Si se emplease un transistor tipo *PNP*, el colector tipo *P* se conectaría al terminal negativo de la alimentación.

En la figura 7-1 (A), el elemento de entrada (base) está polarizado directamente: entrada positiva para un semiconductor *P*. Así, pues, el transistor *conduce* y circula corriente en el circuito del colector. Si se abre el interruptor, como en la figura 7-1 (B), la entrada positiva queda desconectada de la base tipo *P*. Como la base ya no está polarizada directamente, el

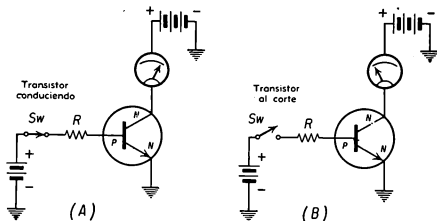


FIG. 7-1. Polaridades de la alimentación de un transistor *NPN*

transistor queda en la condición de *corte* y no conduce corriente. El resistor *R* limita la corriente de la base (cuando el interruptor está cerrado) y determina cuando el transistor *conduce*. Por ejemplo, si esta resistencia se disminuye, el transistor estará *conduciendo* más, y la corriente del colector aumentará. Si se aumenta el valor de *R*, el punto de funcionamiento del transistor se desviará hacia la condición de *corte* y la corriente del colector disminuirá. Como el valor de la corriente de salida (colector), está determinado por el valor de la corriente de entrada (base), la relación de estas corrientes expresa la ganancia del transistor. Esta ganancia de corriente se conoce con el nombre de *beta* del transistor y numéricamente es igual a la *variación de la corriente del colector dividida por la variación de la corriente de la base*.

Las relaciones descritas anteriormente son aplicables también al transistor *PNP* excepto que las polaridades de la alimentación son contrarias. Como se muestra en la figura 7-2, una entrada negativa aplicada a la base tipo *N* hace que el transistor *conduzca*. Cuando se abre el interruptor, la entrada negativa se elimina del semiconductor tipo *N*. Como la base deja de estar polarizada directamente el transistor queda al *corte*.

Aun después de eliminar la polarización directa de la base del transistor, como en la figuras 7-1 (B) y 7-2 (B), continúa circulando una pequeña

corriente en el circuito del colector. Esta corriente, que se conoce con el nombre de corriente de *pérdidas*, o de corriente de corte del colector, o como  $I_{co}$ , varía con la temperatura. Debido al coeficiente de temperatura

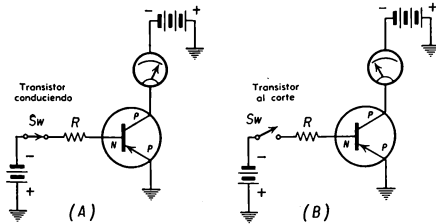


FIG. 7-2. Polaridades de la alimentación de un transistor PNP

de un semiconductor, un aumento de la temperatura produce un aumento de la corriente de pérdida. El aumento de la corriente de pérdida aumenta a su vez la temperatura del transistor y produce un aumento de la corriente de pérdida aún mayor. Este *aumento térmico* puede destruir al transistor.

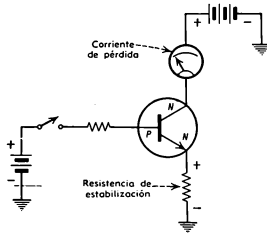


FIG. 7-3. Estabilización por temperatura

Para prever esta situación y estabilizar el punto de funcionamiento del transistor con respecto a la temperatura, se conecta un resistor en el terminal del emisor. Esta situación se muestra en la figura 7-3. Una caída de tensión

que se produce en este resistor, debida a la corriente de pérdida, cuya polaridad es positiva en un emisor tipo *N*. Como consecuencia de esta polarización inversa, el transistor desplaza su punto de funcionamiento hacia la condición de *corte*. Si ahora aumenta la temperatura del transistor, la corriente de pérdida aumenta y tiende a aumentar la caída de tensión en la resistencia de estabilización. Este aumento de la polarización inversa del emisor reducirá el valor de la corriente de pérdida. De esta forma se evita que la corriente de pérdida llegue a alcanzar un valor que cambiasse totalmente el punto de funcionamiento del transistor o incluso llegase a destruirlo.

## 7 - 2. Amplificadores transistorizados

En la figura 7-4 se muestra una etapa amplificadora transistorizada. Este circuito emplea una sola fuente de alimentación en lugar de dos fuentes separadas como en el caso de la figura 7-1. La polarización positiva de la

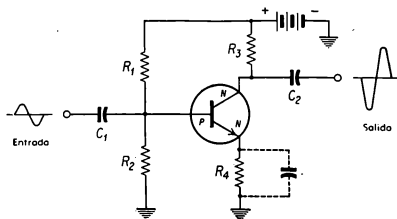


FIG. 7-4. Amplificador transistorizado-emisor común

base se obtiene por medio de un divisor de tensión ( $R_1$  y  $R_2$ ) conectado a la fuente de alimentación del colector. A veces, se omite la resistencia  $R_2$  y entonces  $R_1$  actúa simplemente como resistencia limitadora de la corriente de base. El valor de  $R_1$  (y de  $R_2$  cuando se emplea) determina el valor de la corriente de base, y por tanto la extensión en que el transistor *conduce*. Cuando la etapa trabaja en clase *A*, el valor de la resistencia de base es tal que el transistor está parcialmente conduciendo, es decir, en un punto intermedio entre *conducir* y al *corte*.

Supongamos, en estas condiciones, que se aplica una señal de entrada al amplificador transistorizado, como se indica en la figura 7-4. Durante el semiciclo positivo de la señal de entrada (entrada positiva para una base tipo *P*) el transistor se desplazará a la situación de máxima *conducción*. El aumento de corriente de colector aumentará la caída de tensión en la



resistencia de carga  $R_3$ . Como la mayor parte de la tensión de alimentación disponible cae en  $R_3$ , la tensión del colector disminuye. El semiciclo positivo de la señal de entrada produce una señal de salida negativa.

Durante el semiciclo negativo de la entrada, la polarización directa de la base disminuye. El funcionamiento del transistor se desplaza hacia el *corte* y la corriente del colector disminuye. Como ahora la caída de tensión en  $R_3$  es menor que antes, la tensión del colector aumenta. Por tanto, el semiciclo negativo de la entrada produce un semiciclo positivo a la salida. Las señales de entrada y salida están  $180^\circ$  en oposición de fase. Esta es una característica del amplificador con emisor común que se muestra en la figura 7-4.

La resistencia del emisor  $R_4$ , en la figura 7-4, introduce una degeneración, si no se desacopla (como la resistencia de cátodo en un circuito con tubo de vacío). El aumento de corriente produce una mayor caída en  $R_4$ . Esta tensión, positiva en un emisor tipo *N*, limita el aumento de la corriente del colector. Como resultado de esta degeneración, el colector no aumenta su corriente tanto como en el caso que el emisor estuviese conectado a tierra directamente. Esta limitación de la excursión de la corriente de colector reduce el valor de la tensión de salida, es decir, reduce la ganancia de la etapa. Se puede conectar un capacitor en paralelo con el resistor de emisor, como se indica con la línea de trazos en la figura 7-4; este capacitor mantiene la tensión constante en  $R_4$ , evitando que esta tensión siga las variaciones de la señal de entrada. Como consecuencia de que la tensión de emisor no puede aumentar y disminuir para oponerse a los cambios de la corriente de colector, no ocurre degeneración y la ganancia de la etapa aumenta.

Aunque la degeneración disminuye la ganancia, mejora el comportamiento del circuito. La degeneración reduce la distorsión y estabiliza el circuito, de forma que la ganancia se hace prácticamente independiente de: (1) las variaciones de la tensión de alimentación, (2) de las variaciones de valor de los componentes y (3) del envejecimiento o el reemplazo de transistores. Para obtener estas ventajas en el comportamiento del circuito algunos diseñadores omiten intencionadamente el condensador de paso del emisor.

En el amplificador transistorizado, los capacitores de acoplamiento son de gran valor comparados con los que se emplean en los amplificadores con válvulas de vacío. Como la impedancia de entrada de una válvula de vacío es relativamente alta, la mayoría de la señal de entrada aparece en esta impedancia y hay muy poca caída de tensión en la reactancia del capacitor de acoplamiento. Sin embargo, el transistor tiene una impedancia de entrada relativamente baja. En esta baja impedancia se desarrolla menos señal y la mayor parte de la entrada cae en la reactancia del capacitor de acoplamiento. Para reducir al mínimo esta pérdida de señal, la reactancia del capacitor de acoplamiento debe ser pequeña comparada con la impedancia de entrada del transistor. Esta es la razón por la cual se emplean capacitores de acoplamiento de gran valor en los amplificadores transistorizados. Los valores típicos están comprendidos en el margen de 2 a 20 picofarad según la frecuencia, en baja frecuencia, que se desee.

Las etapas de amplificación con transistores pueden acoplarse directamente, por *RC* o por transformador, como se muestra en la figura 7-5. Lo mismo que en el caso de amplificadores con válvulas, el acoplamiento directo tiene la ventaja de extender la respuesta en bajas frecuencias hasta práctica-

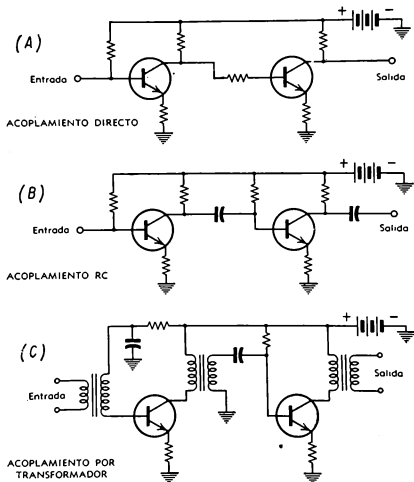


FIG. 7-5. Métodos de acoplamiento

mente cero ciclos por segundo (c.c.). El corrimiento sigue siendo un problema. El acoplamiento *RC*, o por transformador, elimina este problema a expensas de aumentar la complejidad del circuito (más componentes) y limitar la respuesta en bajas frecuencias. En la figura 7-5 se muestran transistores *NPN*, pero pueden emplearse *PNP* invirtiendo la polaridad de la alimentación. En la figura 7-5 (C) se muestran dos variedades de acoplamiento por transformador. En la primera etapa, la corriente de base del

transistor recorre el bobinado secundario del transformador. *Esta corriente puede saturar el núcleo de hierro del transformador, especialmente si el transformador es del tipo miniatura. Para evitar esto se emplea un capacitor de bloqueo como en la segunda etapa de la figura 7-5 (C). En este caso el secundario sólo es recorrido por la corriente alterna de la señal.*

Los amplificadores que se muestran en las figuras 7-4 y 7-5 son circuitos en *emisor común*: la señal de entrada se aplica a la base, la salida se toma del colector y el emisor es común a los circuitos de entrada y salida. En la

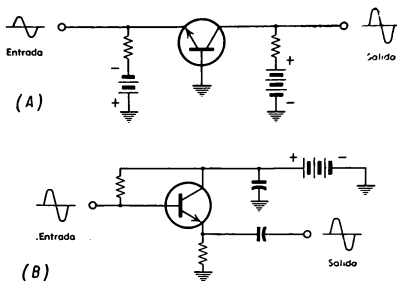


FIG. 7-6. Amplificadores en base común y colector común

figura 7-6 (A) se muestra un amplificador en *base común*. En este caso, la señal de entrada se aplica al emisor, la salida se toma del colector y la base es común (señal a tierra). Este circuito no invierte la polaridad de la señal como lo hace el amplificador emisor común. Por ejemplo, el semiciclo negativo de la señal de entrada llevará al transistor a *conducir* totalmente (entrada negativa a un emisor tipo *N*). Como consecuencia, la corriente de colector aumenta, hay más caída de tensión en la resistencia de carga y la tensión del colector disminuye. Así, pues, la alternancia negativa de la señal de entrada produce una señal negativa a la salida. La impedancia de entrada del circuito en base común es más baja y la impedancia de salida más alta, si se comparan con las del circuito emisor común. En el circuito en configuración de base común, la relación entre la corriente de salida (colector) y la corriente de entrada (emisor) expresa la ganancia de corriente del transistor. Esta ganancia de corriente se conoce con el nombre de *alpha* y es igual numéricamente a la *variación de la corriente del colector* dividida por la *variación de la corriente del emisor*.

En el circuito de *colector común*, figura 7-6 (B), la señal de entrada se aplica a la base, la salida se toma del emisor y el colector es común (señal a tierra). Como consecuencia de su semejanza con la válvula conectada como seguidor catódico, este circuito suele denominarse *seguidor de emisor*. La ganancia de tensión del seguidor de emisor, lo mismo que en el seguidor de cátodo, es menor que la unidad. Esta pérdida de amplitud de la señal

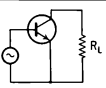
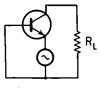
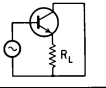
| CONFIGURACION DEL CIRCUITO                                                                                                                                                                     |                                                                                   | CARACTERISTICAS*                                                                                                                                                                         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| EMISOR<br>COMUN                                                                                                                                                                                |  | Impedancia de entrada moder. (1,3 K)<br>Impedancia de salida moderada (50 K)<br>Ganancia de corriente alta (35)<br>Ganancia de tensión alta (-270)<br>Mayor ganancia de potencia (40 db) |
| BASE<br>COMUN                                                                                                                                                                                  |  | Menor impedancia de entrada (35 Ω)<br>Mayor impedancia de salida (1 M)<br>Ganancia de corriente baja (-0,98)<br>Ganancia de tensión alta (380)<br>Ganancia de potencia moder. (26 db)    |
| COLECTOR<br>COMUN<br>(Seguidor<br>de emisor)                                                                                                                                                   |  | Mayor impedancia de entrada (350 K)<br>Menor impedancia de salida (500 Ω)<br>Ganancia de corriente alta (-36)<br>Ganancia de tensión unidad (1,00)<br>Menor ganancia de potencia (15 db) |
| * Los valores numéricos son típicos para un 2N525 en audio frecuencia con una polarización de 5 V y 1 mA, una resistencia de carga de 10 KΩ y una resistencia de la fuente (generador) de 1 KΩ |                                                                                   |                                                                                                                                                                                          |

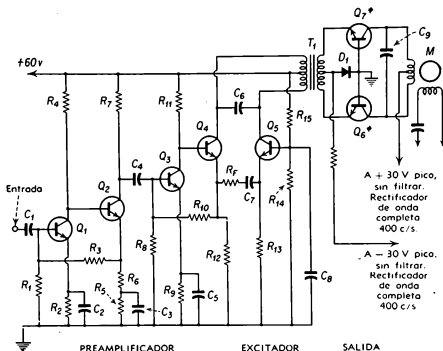
FIG. 7-7. Características de un amplificador transistorizado

es tolerable en aquellas aplicaciones que requieran el empleo de una etapa de amplificación con alta impedancia de entrada (para reducir al mínimo la carga que se presenta a la etapa precedente). El seguidor de emisor no produce inversión de la polaridad de la señal. Un semiciclo positivo de la señal de entrada (a la base tipo *P* en la figura 7-6) lleva al transistor hacia la máxima conducción. El aumento de corriente produce una caída de tensión mayor en la resistencia del emisor. Por tanto, la salida se hace más positiva durante la alternancia positiva de la señal de entrada.

En la figura 7-7 están tabuladas las características de los circuitos en emisor común, en base común y en colector común. En los esquemas se muestran los circuitos respecto a la señal, es decir, que no están representadas las fuentes de alimentación.

### 7 - 3. Servoamplificadores

En la figura 7-8 se muestra un amplificador transistorizado diseñado para alimentar a un servomotor de 2 w. El circuito ha sido diseñado para una señal de error de 400 c/s. y para trabajar en un ambiente cuyo margen de temperatura está comprendido entre  $-55^{\circ}$  y  $125^{\circ}\text{C}$ . Los transistores  $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $Q_3$  y los elementos asociados del circuito constituyen el *preamplificador*,  $Q_4$  y  $Q_5$  constituyen el *excitador* y  $Q_6$  y  $Q_7$  se emplean como etapa de *salida*.



|                           |                  |
|---------------------------|------------------|
| $R_1$                     | 24K              |
| $R_2$                     | 4,7K             |
| $R_3, R_{11}$             | 22K              |
| $R_4$                     | 51K              |
| $R_5, R_9$                | 10K              |
| $R_6$                     | 180 $\Omega$     |
| $R_7$                     | 39K              |
| $R_8$                     | 15K              |
| $R_{10}$                  | 9,1K             |
| $R_{12}$                  | 2,7K             |
| $R_{13}, R_{14}$          | 2,4K             |
| $R_{15}$                  | 3,6K             |
| $C_1, C_2, C_3, C_5, C_7$ | 20 $\mu\text{f}$ |

|                 |                        |
|-----------------|------------------------|
| $C_4, C_6$      | 10 $\mu\text{f}$       |
| $C_8$           | 6 $\mu\text{f}$        |
| $Q_1, Q_2, Q_3$ | GE 2N335 OR GE 2N336   |
| $Q_4, Q_5$      | GE 2N656A              |
| $Q_6, Q_7$      | GE 2N497A OR GE 2N498A |
| $T_1$           | 12,5:1 Reductor        |
| $D_1$           | GE 1N676               |

Notas:

1. ★ Refrigeración para  $Q_6$  y  $Q_7$
2. Ajustar  $R_F$  para obtener la ganancia deseada
3.  $C_4$  ajustado para obtener en el motor el máximo par de frenado
4.  $C_4$  ajustado para sintonizar  $T_1$

FIG. 7-8. Amplificador transistorizado para servomotor de dos watt. (G. E. Co.)

Los transistores  $Q_1$  y  $Q_2$  están conectados como amplificadores en emisor común y están acoplados directamente. La estabilización por temperatura de estas dos etapas se lleva a cabo por medio de las resistencias de emisor  $R_2$  y  $R_5$ , y la estabilización de la ganancia se obtiene por la realimentación (negativa) desde el emisor de  $Q_2$  a la base de  $Q_1$ . El transistor  $Q_2$  está acoplado por capacitor al  $Q_3$ , que a su vez está conectado como amplificador en emisor común. Entre  $Q_3$  y  $Q_4$  se emplea acoplamiento directo y la resistencia  $R_{10}$  proporciona realimentación negativa a  $Q_3$ .

Los transistores  $Q_4$  y  $Q_5$  proporcionan la señal en push-pull para la etapa de salida.  $Q_4$  trabaja como un seguidor de emisor cuya salida se acopla al emisor de  $Q_5$ . A su vez,  $Q_5$  trabaja como una etapa en base común. Esta combinación (un seguidor de emisor alimentando a un amplificador en base común) hace que las corrientes de colector de los dos transistores varíen en direcciones opuestas; es decir, que cuando la corriente del colector de  $Q_4$  *aumenta*, la corriente del colector de  $Q_5$  *disminuye*. Durante el semiciclo positivo de la señal de error en la base de  $Q_4$ , la corriente del colector de  $Q_4$  *aumentará*. La alternancia positiva de la señal se acopla desde el emisor de  $Q_4$  hasta el emisor de  $Q_5$ . Como el emisor de  $Q_5$  es un semiconductor tipo *N*,  $Q_5$  se lleva a la situación de *corte*, y su corriente de colector *disminuye*. La corriente que circula por la mitad del primario del transformador  $T_1$  aumenta y la corriente de la otra mitad disminuye. El bobinado primario del transformador  $T_1$  se sintoniza con el condensador  $C_6$ .

Los transistores  $Q_6$  y  $Q_7$  funcionan en push-pull como amplificadores en base común. Los emisores reciben sus entradas de los extremos opuestos del secundario del transformador  $T_1$ , y los colectores están conectados a los extremos opuestos del bobinado del campo de control de un servomotor con toma central. El campo principal del motor se alimenta a través de un condensador cambiador de fase de una fuente de 400 c/s. Las tensiones de alimentación del colector y del emisor se obtienen de un rectificador de onda completa sin filtraje que se alimenta de la fuente alterna de 400 c/s. El empleo de tensiones de alimentación sin filtrar reduce la disipación de los transistores. Ambos transistores de salida están montados sobre refrigeradores (superficies de radiación de calor de cobre o aluminio).

La alimentación negativa sin filtrar proporciona una polarización directa para el emisor tipo *N*, y los transistores están parcialmente *conduciendo*. Durante las señales de entrada de gran amplitud, la tensión inducida en el secundario de  $T_1$  hace que el diodo  $D_1$  conduzca. La conducción del diodo puentes la tensión de alimentación negativa haciendo que el transistor se desplace hacia la dirección de *corte*.

En la figura 7-9 se muestra un amplificador transistorizado de un registrador "Transcope" de Taylor Instrument Co. El amplificador se divide en tres secciones: amplificador de acoplamiento de impedancia, amplificador de *tensión* y amplificador de potencia. Para señales de error de c.c. se emplea un vibrador, como se muestra en la figura. La lámina del vibrador está conectada por medio de un capacitor  $C_1$  a la etapa de entrada del ampli-

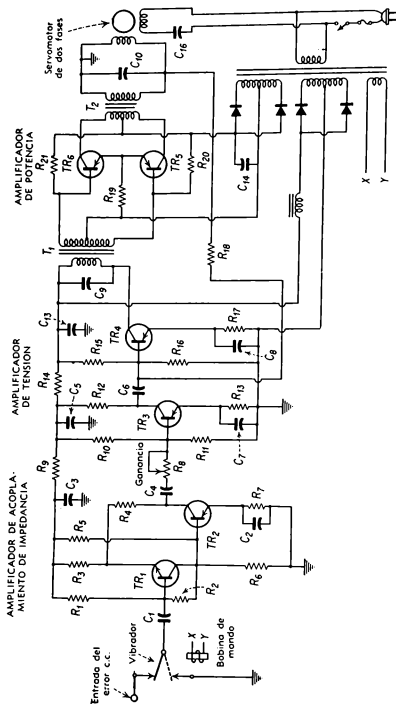


FIG. 7-9. Amplificador transistorizado para registrador-controlador electrónico.  
(Taylor Instrument Co.)

## LISTA DE COMPONENTES PARA LA FIG. 7-9

|                                   |                                   |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| R <sub>1</sub> .....1,5 meg       | C <sub>1</sub> .....0,1 $\mu$ f   |
| R <sub>2</sub> .....3,9 meg       | C <sub>2</sub> .....100 $\mu$ f   |
| R <sub>3</sub> .....2,2K          | C <sub>3</sub> .....100 $\mu$ f   |
| R <sub>4</sub> .....3,3K          | C <sub>4</sub> .....100 $\mu$ f   |
| R <sub>5</sub> .....5,6K          | C <sub>5</sub> .....50 $\mu$ f    |
| R <sub>6</sub> .....2,2K          | C <sub>6</sub> .....100 $\mu$ f   |
| R <sub>7</sub> .....4,7K          | C <sub>7</sub> .....100 $\mu$ f   |
| R <sub>8</sub> .....50K           | C <sub>8</sub> .....100 $\mu$ f   |
| R <sub>9</sub> .....1K            | C <sub>9</sub> .....0,2 $\mu$ f   |
| R <sub>10</sub> .....18K          | C <sub>10</sub> .....1 $\mu$ f    |
| R <sub>11</sub> .....4,7K         | C <sub>13</sub> .....50 $\mu$ f   |
| R <sub>12</sub> .....4,7K         | C <sub>14</sub> .....1000 $\mu$ f |
| R <sub>13</sub> .....2,2K         | C <sub>16</sub> .....0,05 $\mu$ f |
| R <sub>14</sub> .....1,8K         |                                   |
| R <sub>15</sub> .....6,8K         | TR <sub>1</sub> .....2N169        |
| R <sub>16</sub> .....4,7K         | TR <sub>2</sub> .....2N369        |
| R <sub>17</sub> .....4,7K         | TR <sub>3</sub> .....2N369        |
| R <sub>18</sub> .....1 meg        | TR <sub>4</sub> .....2N44         |
| R <sub>19</sub> .....1,5 $\Omega$ | TR <sub>5</sub> .....2N235A       |
| R <sub>20</sub> .....3,3K         | TR <sub>6</sub> .....2N235A       |
| R <sub>21</sub> .....3,3K         |                                   |

ficador. Cuando la lámina vibra, el circuito de entrada del amplificador se conecta alternativamente a la tensión de c.c. del error y a tierra. De esta forma, la tensión de c.c. de error se convierte en una señal pulsada que puede ser amplificada en las etapas acopladas por *RC* o por transformador.

El amplificador de acoplamiento de impedancia emplea un transistor *NPN* (*TR*<sub>1</sub>) y un transistor *PNP* (*TR*<sub>2</sub>). Como *TR*<sub>1</sub> es una unidad *NPN*, su resistencia de carga del colector está conectada al positivo (tierra) de la alimentación. La base tipo *P* de este transistor está conectada al positivo de la alimentación a través de las resistencias *R*<sub>2</sub> y *R*<sub>6</sub>. Estas resistencias, en unión de *R*<sub>1</sub>, constituyen un divisor de tensión y determinan la magnitud de la polarización directa de la base tipo *P*. Realmente, la base es negativa con respecto a tierra, pero es positiva respecto al emisor (el cual está conectado a la alimentación negativa a través de la resistencia *R*<sub>3</sub>). La base tipo *P* es, por tanto, positiva respecto al emisor y esta polarización positiva hace que el transistor trabaje en un punto situado en la región de *conducción*.

El colector del transistor *TR*<sub>1</sub> está acoplado directamente a la base del *TR*<sub>2</sub>. La base tipo *N* de la segunda etapa está conectada a través de *R*<sub>5</sub> al negativo de la alimentación, situando a este transistor también en la región de *conducción*. La resistencia del emisor *R*<sub>4</sub> estabiliza al circuito respecto a las variaciones de la temperatura. La resistencia de carga del colector de la segunda etapa consiste en la combinación en serie de *R*<sub>3</sub> y *R*<sub>1</sub>. Como *R*<sub>3</sub> es también la resistencia del emisor de la primera etapa, una parte de la señal del colector de la segunda etapa se realimenta al emisor de la primera. Esta realimentación negativa estabiliza el circuito y produce además el efecto de aumentar la impedancia de entrada del amplificador. Sin la realimentación



negativa, la impedancia de entrada del amplificador sería del orden de varios cientos o varios miles de ohm; con la realimentación, la impedancia de entrada se eleva a unos 500.000 ohm. Se precisa alta impedancia de entrada para reducir al mínimo el efecto de carga del amplificador sobre el circuito detector del error. Como resultado de la realimentación negativa, la gerencia de tensión del amplificador de acoplamiento de impedancia es solamente de *dos*.

El acoplamiento entre  $TR_2$  y  $TR_3$  se hace por medio del capacitor  $C_4$  y el resistor variable  $R_8$ . Esta resistencia variable determina la magnitud del acoplamiento de señal a  $TR_3$  y funciona como control de ganancia

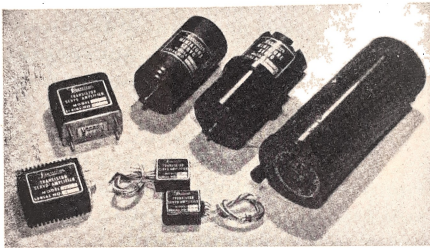


Fig. 7-10. Servoamplificadores transistorizados. (Librascope Division, General Precision Inc.)

ajustándose para eliminar la oscilación. Los transistores  $TR_3$  y  $TR_4$  trabajan como amplificadores en emisor común. La polarización directa para las bases de estos dos transistores PNP se obtiene mediante los divisores de tensión conectados a la alimentación negativa ( $R_{10}$  y  $R_{11}$  para  $TR_3$ , y  $R_{15}$  y  $R_{16}$  para  $TR_4$ ). Las resistencias de emisor  $R_{13}$  y  $R_{17}$  proporcionan la estabilización por temperatura. La estabilización de la ganancia se lleva a cabo por medio de una realimentación negativa desde el transformador de salida ( $T_2$ ) a la base del transistor  $TR_4$ . El capacitor  $C_9$  sintoniza el primario del transformador  $T_1$  aproximadamente a la frecuencia de 60 c/s. (frecuencia del vibrador). El primario del transformador  $T_1$  actúa como resistencia de carga en el colector de  $TR_4$ . El circuito *tanque* que forman el primario de  $T_1$  y el capacitor  $C_9$  elimina el ruido y cualquier otra frecuencia presente. El secundario de  $T_1$  proporciona la señal en push-pull para la etapa de salida.

$TR_5$  y  $TR_6$  son transistores de potencia conectados en push-pull para

proporcionar una potencia de salida mayor al campo de control del servomotor. La polarización directa para las bases tipo *N* de cada uno de estos dos transistores se obtiene de la alimentación negativa a través de las resistencias  $R_{20}$  y  $R_{21}$ . El campo de control del servomotor está sintonizado con el capacitor  $C_{10}$  y la alimentación del campo principal se obtiene de una fuente de alimentación de 60 c/s. a través del capacitor cambiador de fase  $C_{10}$ .

### SUMARIO

Como en otros tipos de equipos, en los servomecanismos los transistores ofrecen las ventajas de su pequeño tamaño, su poco consumo de potencia y la resistencia al choque y a la vibración.

En el transistor *NPN*, el emisor y el colector de semiconductor tipo *N* y la base es tipo *P*. Una disposición contraria se emplea en el transistor *PNP*. En ambos tipos de transistores la junta del colector se polariza inversamente y la corriente del colector se controla mediante la polarización de la junta de entrada. Una polarización directa aplicada a la junta de entrada hace al transistor *conductor* y una polarización inversa lo *corta*.

Los circuitos amplificadores transistorizados se clasifican en base común, emisor común y colector común, de acuerdo con el elemento común a los circuitos de entrada y salida. El circuito colector común, conocido también como seguidor de emisor, se caracteriza por tener una impedancia de entrada alta y una impedancia de salida baja. El circuito en base común tiene unas características opuestas y el circuito emisor común es un intermedio entre los dos anteriores.

El acoplamiento entre etapas en los amplificadores transistorizados puede ser directo, por transformador o por circuito *RC*. Como los transistores suelen tener una impedancia de entrada relativamente baja comparados con las válvulas, los capacitores de acoplamiento son de valor más alto. Por esta misma razón, se emplean transformadores de reducción para hacer efectivo el acoplamiento de impedancia.

En las etapas de salida de los servoamplificadores se emplean transistores de potencia para alimentar el corrector del error, normalmente un servomotor. Estos transistores se montan en dispositivos *refrigeradores* que disipan el calor.

### PREGUNTAS

1. ¿Cuál es la polaridad de la tensión aplicada al colector de un transistor *PNP* y de un transistor *NPN*?
2. Un transistor *NPN* se conecta como amplificador en emisor común. ¿Cuándo será mayor la corriente del colector, durante el semiciclo positivo o durante el negativo de la señal de entrada aplicada a la base?

3. ¿Qué se entiende por *aumento térmico*?
4. Explicar cómo una resistencia conectada en el emisor evita la destrucción por aumento térmico.
5. ¿Qué es el *alfa* de un transistor?
6. ¿Qué es el *beta* de un transistor?
7. Dibujar un diagrama de un seguidor de emisor y explicar su funcionamiento.
8. Comparando un circuito en base común con uno en colector común, ¿cuál tiene mayor impedancia de entrada y cuál tiene menor impedancia de salida?
9. ¿En cuál de las tres configuraciones que se ilustran en la figura 7-7 está la señal de salida desfasada  $180^\circ$  con respecto a la señal de entrada?
10. ¿Cuál es el objeto de la refrigeración?

## CAPÍTULO 8

### AMPLIFICADORES DEL ERROR: MAGNETICOS

#### 8 - 1. Introducción

El amplificador magnético es mecánico y eléctricamente un elemento robusto, seguro y de larga vida. Posee una gran inmunidad a la vibración, a los golpes; puede ser sellado contra la humedad y el polvo; proporciona una gran ganancia de potencia por etapa; y puede funcionar instantáneamente por no necesitar tiempo de calentamiento. Su principal desventaja es el retardo de tiempo de su respuesta a una señal de entrada. En servomecanismos se emplea el amplificador magnético en unión de amplificadores electrónicos y también puede emplearse solo.

#### 8 - 2. El reactor saturable

La mayor parte de los núcleos de hierro (y los circuitos en que se emplean) han sido diseñados de forma que no se produzca la saturación durante el funcionamiento normal del sistema. Si se llegase a saturar el núcleo magnético, la inductancia de la bobina disminuiría. Esta disminución de la inductancia tiene lugar porque el flujo magnético en un núcleo saturado se mantiene prácticamente constante y no puede inducirse fuerza electromotriz en la bobina. La bobina, por tanto, pierde su propiedad de oponerse a la variación de la corriente que la recorre (disminución de la inductancia).

En el reactor saturable, el núcleo se satura intencionadamente para reducir el valor de la inductancia. Este componente funciona como una inductancia variable; el valor de la inductancia se controla variando el grado de saturación del núcleo. Básicamente, el reactor saturable consiste en dos bobinas arrolladas a un núcleo magnético, como se muestra en la figura 8-1. El núcleo que se muestra en la figura tiene forma de anillo, pero puede ser también de otra forma. La bobina de *carga* se conecta en serie con la carga y la alimentación de c.a. La corriente que circula por la carga está determinada por el valor de la reactancia inductiva de la bobina de carga. Cuando se abre el interruptor, como en la figura 8-1 (A), la corriente que circula por la carga es pequeña debido a que la reactancia de la bobina de carga es

elevada. Si se cierra el interruptor, como en la figura 8-1 (B), la corriente que circula por la carga aumenta. Este aumento tiene lugar como consecuencia de la saturación del núcleo producida por la c.c. que circula por la bobina de

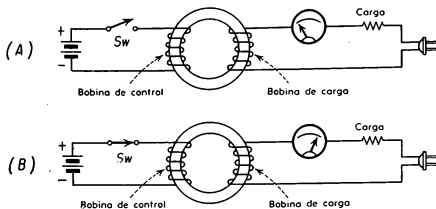


FIG. 8-1. El reactor saturable

control. La reactancia de la bobina de carga disminuye y permite que circule una corriente mayor por la carga.

En la figura 8-1 se muestran los dos extremos: máxima reactancia inductiva de la bobina de carga (corriente cero en la bobina de control) y mínima reactancia inductiva (corriente máxima en la bobina de control). Si se conecta una resistencia variable en serie con la bobina de control, como se indica en la figura 8-2, el valor de la corriente continua puede ajustarse para

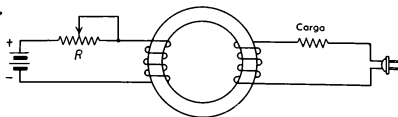


FIG. 8-2. El amplificador magnético

producir sólo una saturación parcial del núcleo. La reactancia inductiva de la bobina de carga tendrá, de esta forma, un valor intermedio entre el máximo y el mínimo. De esta forma, puede emplearse la resistencia variable del circuito de control para ajustar el valor de la corriente en la carga.

Se emplean varios símbolos esquemáticos para representar los reactores saturables. Algunos de estos símbolos se representan en la figura 8-3, incluyendo el aceptado universalmente en C.

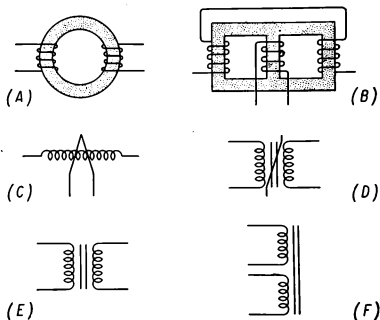


FIG. 8-3. Símbolos esquemáticos para los reactores saturables

### 8 - 3. Amplificadores magnéticos

El circuito básico que se representa en la figura 8-2 tiene dos desventajas importantes:

1. Como la bobina de carga está conectada a una fuente de c.a. funciona como el primario de un transformador e induce tensión en la bobina de control. La bobina de control está formada por muchas vueltas de hilo fino para poder proporcionar un control adecuado con valores relativamente bajos de la corriente continua que la recorre. Como consecuencia de esto, la acción del transformador es elevadora y la tensión inducida en la bobina de control es relativamente alta. Esta tensión puede perturbar el funcionamiento normal del circuito conectado a la bobina de control e incluso llegar a dañar a los componentes del mismo. Esta acción de transformador indeseable puede evitarse dividiendo la bobina de control en dos mitades, de forma que la tensión inducida en cada una de ellas se cancele. Esta técnica puede emplearse cuando la estructura del núcleo es de tres brazos, como se muestra en la figura 8-3 (B). Se puede obtener el mismo resultado empleando dos reactores saturables en la forma que se indica en la figura 8-4. Las dos

bobinas de control se conectan en serie y en oposición de forma que la tensión inducida en una anula a la tensión inducida en la otra. También puede conseguirse esta anulación conectando las dos bobinas de control en serie aditiva y las dos bobinas de carga en serie y en oposición.

2. La segunda desventaja del circuito básico de la figura 8-2 es la tendencia del núcleo a perder la saturación durante un semiciclo de la tensión alterna de alimentación. Como la corriente que circula por la bobina de

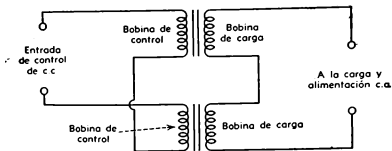


FIG. 8-4. Anulación de la tensión inducida

carga es alterna, solamente medio ciclo de esta corriente está en el sentido conveniente para ayudar, sumándose a la corriente de control, a mantener el núcleo saturado. El semiciclo opuesto de la corriente de carga está en sentido tal que se opone a la saturación. Para evitar esta saturación se conecta un diodo en serie con la carga como se muestra en la figura 8-5. El diodo permite la circulación de la corriente en la carga solamente en el sentido que ayuda a mantener la saturación y evita la circulación en sentido opuesto. Como la corriente en la carga contribuye a la saturación del núcleo, este circuito se conoce con el nombre de amplificador magnético *autosaturable*.

Los primeros reactores saturables se construyeron con núcleos de acero al silicio similares a los que se emplean en transformadores. Para los amplificadores magnéticos estos núcleos tienen ciertos inconvenientes: la densidad de flujo es relativamente baja y las pérdidas por histéresis son elevadas. Las unidades modernas emplean núcleos de aleaciones de hierro y níquel con las características magnéticas apropiadas. Se dispone de aleaciones de alta permeabilidad y de grano orientado conocidas con nombres comerciales, como Permalloy, Mumetal, Orthonal y Deltamax. La orientación del grano se lleva a cabo por laminación en frío y lleva al material a un sentido *prefijado* de magnetización. El Permalloy y el Mumetal son particularmente útiles en circuito de control de bajo nivel porque la saturación se produce con valores muy bajos de la corriente de control. El Orthonal y el Deltamax se emplean en aplicaciones de mayor nivel y tienen la ventaja de poder gobernar más potencia para unas dimensiones determinadas del núcleo. Los materiales modernos tienen un lazo de histéresis *rectangular*, en el cual la densidad de

flujo cambia instantáneamente cuando la corriente alcanza un valor crítico. Esta característica es comparable con la de un tiratrón: la corriente de placa aumenta instantáneamente cuando la polarización de la rejilla alcanza un valor crítico.

El valor de la corriente de control determina el instante en el cual el núcleo se "dispara" o satura durante el ciclo de la tensión de alimentación. En la figura 8-5 (A), el diodo pennite que la corriente circule por la bobina

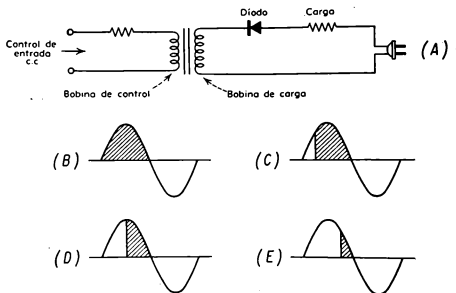


FIG. 8-5. Amplificador autosaturable de media onda

de carga solamente durante medio ciclo de la tensión alterna de alimentación. Durante el semiciclo en que la corriente de carga no puede circular, la corriente de control "restablece" el flujo a un valor determinado por el valor de la corriente de control y el número de vueltas de la bobina de control. Con este valor del flujo como punto de partida, la corriente de carga durante el siguiente semiciclo de la alimentación lleva al núcleo a una saturación completa. El punto en el cual ocurre la saturación depende del valor en el cual el flujo fue previamente restablecido por la corriente de control. Si la corriente de control es elevada, el núcleo permanece en saturación completa durante el semiciclo en que no conduce corriente el circuito de carga. Como el núcleo está totalmente saturado, aparece en la carga el semiciclo completo de la alimentación. Esto se ilustra en la figura 8-5 (B). El área rayada representa el tiempo durante el cual la tensión de alimentación aparece en la carga.

Si la corriente de control disminuye de valor, el núcleo se restablecerá a un nivel de flujo más bajo (saturación parcial) durante el semiciclo en que no conduce el circuito de carga. La corriente que circula durante el



semiciclo en que conduce el circuito de carga, deberá llevar al núcleo desde una saturación parcial hasta la saturación completa antes que la alimentación pueda aparecer en la carga. Esto se ilustra en la figura 8-5 (C). Valores aún menores de la corriente de control (o incluso una corriente de control en sentido inverso) restablecerán el flujo a valores aún más bajos (o valores mayores en sentido opuesto). En estas condiciones, transcurrirá más tiempo antes que el núcleo alcance la saturación completa; es decir, que el núcleo se "dispara" más tarde durante el semiciclo en que conduce el circuito de carga. Esto se ilustra en las figuras 8-5 (D) y 8-5 (E).

Frecuentemente se incluye una tercera bobina en el reactor saturable y que se conoce con el nombre de *polarización* (véase figura 8-9). El valor de la corriente que circula en este bobinado, determina el valor del flujo al cual

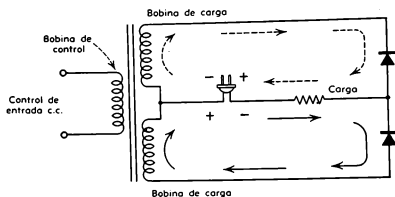


FIG. 8-6. Amplificador magnético doblador

se restablecerá el núcleo durante el semiciclo que no conduce el circuito de carga. La corriente de polarización tiene normalmente un sentido que es opuesto a la corriente de control. En ausencia de corriente de control, la corriente de polarización lleva al núcleo a saturación negativa (saturación en sentido opuesto al que corresponde con el sentido en el cual la corriente de carga satura al núcleo). Cuando se aplica la corriente de control, se opone a la corriente de polarización y se establece un nuevo valor al cual se restablece el flujo. Esta combinación de corriente de polarización y corriente de control hace que pueda restablecerse el flujo a cualquier valor intermedio, entre los límites de saturación positiva y negativa.

Como la corriente solamente puede circular por la carga durante la mitad de cada ciclo de la tensión alterna de alimentación, el circuito que se presenta en la figura 8-5 es un circuito de *media onda*. Para conseguir que la corriente circule por la carga durante ambos semiciclos es necesario emplear dos diodos, como se muestra en la figura 8-6. Aunque este circuito se conoce con el nombre de *onda completa*, la corriente en la carga *no* es una corriente

rectificada. Por esta razón el circuito suele denominarse *doblador*. Las flechas de puntos y las de trazo continuo en la figura 8-6 indican la circulación de la corriente durante ambos semiciclos de la alimentación. Nótese que la corriente en la carga es alterna, pero la corriente que recorre la bobina de carga durante ambos semiciclos está en el sentido que ayuda a la saturación del núcleo. Como en el circuito simple del cual se ha derivado (figs. 8-2 y 8-5) la corriente de control en este circuito, satura al núcleo, y por tanto reduce la reactancia inductiva en serie con la carga.

El circuito de la figura 8-6 permite el control de una *corriente alterna* en una carga. Si la carga es de tal naturaleza que requiera c.c., puede añadirse un circuito rectificador en puente. En la figura 8-7 se muestra una

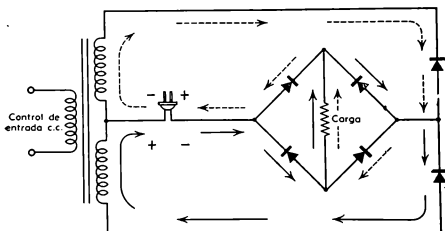


FIG. 8-7. Amplificador magnético con c.c. en la carga

disposición de este tipo. Las flechas de puntos y de trazo continuo indican el sentido de la corriente que circula durante ambos semiciclos de la tensión de alimentación. Nótese que la corriente tiene el mismo sentido en la carga durante ambos semiciclos y que la corriente en la bobina de carga está siempre en el sentido que mantiene al núcleo en saturación.

El circuito de la figura 8-7 puede simplificarse como se muestra en la figura 8-8. En este caso se requieren solamente cuatro diodos en vez de seis. La corriente en la carga sigue siendo c.c. y el circuito continúa siendo auto-saturable (la corriente no puede circular por las bobinas de carga en un sentido que origine la pérdida de saturación del núcleo).

A veces se incluye una bobina de realimentación en el reactor saturable, como en la figura 8-9. Este bobinado se conecta en serie (o en paralelo) con la carga, de forma que la corriente de carga circule también por el bobinado de realimentación. El bobinado de realimentación puede conectarse también de tal forma que ayude, o se oponga, al efecto de la corriente de control. Si

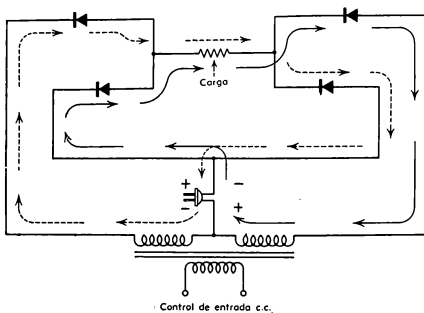


FIG. 8-8. Otro tipo de amplificador magnético con c.c. en la carga

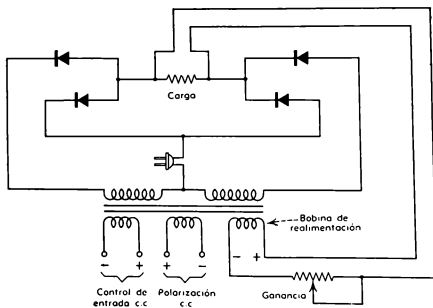


FIG. 8-9. Amplificador magnético con realimentación

la corriente de realimentación circula en tal sentido que ayuda a la corriente de control y por tanto a la saturación, la realimentación es positiva o regenerativa. En estas condiciones, un pequeño aumento de la corriente de control producirá un aumento extremadamente grande de la corriente en la carga (la corriente incrementada en la carga circula por el bobinado de realimentación saturando más al núcleo, lo cual hace que aumente la corriente en la carga, y así sucesivamente). Si las conexiones de la bobina de realimentación se invierten, la realimentación será negativa o degenerativa. Un aumento de la corriente en la carga producirá un aumento de la corriente de realimentación en tal sentido que tiende a reducir la saturación del núcleo. El tipo de realimentación que debe emplearse depende de si tiene más importancia la ganancia o la linealidad del amplificador en la aplicación particular a que se destina. Un amplificador magnético que emplea realimentación se muestra en la figura 8-9. La resistencia variable en serie con el bobinado de realimentación determina la magnitud de la corriente de realimentación y por tanto la ganancia del circuito.

De la misma forma que en los amplificadores transistorizados o en los de válvulas, los amplificadores magnéticos pueden conectarse en cascada para obtener una ganancia mayor. Por ejemplo, varias etapas del tipo que se muestra en la figura 8-8 o en la figura 8-9 pueden conectarse en cascada, empleando la bobina de control de cada tipo como carga de la etapa precedente. Una pequeña variación de la corriente de control de la primera etapa producirá una variación mucho mayor en la corriente de control de la segunda, una mayor variación en la corriente de control de la tercera y así sucesivamente.

#### 8 - 4. Servoamplificadores

En la figura 8-10 se muestra un amplificador magnético controlando un motor de campo dividido de c.c. Las dos mitades del circuito son esencialmente similares al amplificador magnético que se muestra en la figura 8-7. La armadura y el campo directo del motor están conectados como carga de uno de los rectificadores en puente, y la armadura y el campo inverso están conectados como carga del otro puente. Normalmente (error a la entrada nulo) ambas mitades del circuito conducen igualmente y los campos directo e inverso son excitados igualmente. En estas condiciones el motor no puede girar.

Los bobinados de control están conectados de tal forma que se oponen a los bobinados de polarización en una mitad del circuito y se suman en la otra mitad. Si se aplica una señal del error c.c. a las bobinas de control conectadas en serie, una de las mitades del circuito conducirá más (se disparará antes en el ciclo) y la otra mitad conducirá menos (se disparará más tarde en el ciclo). La polaridad de la tensión del error determina la dirección de la corriente que circula en el bobinado de control y por tanto determina cuál de las dos mitades conduce más. Una polaridad determinada del error

producirá un aumento de la corriente en el bobinado del campo directo del motor y una disminución de la corriente en el bobinado del campo inverso. Una tensión del error de polaridad contraria producirá un efecto contrario. Por esta razón, el motor gira en un sentido que depende de la polaridad de la tensión del error aplicada a la entrada. Como en otros tipos

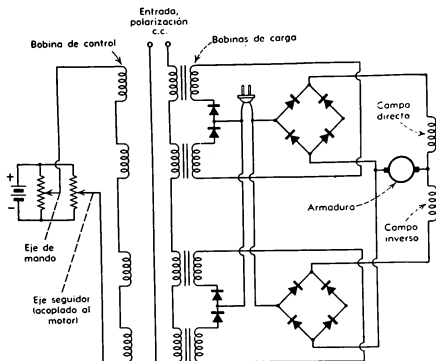


FIG. 8-10. Amplificador magnético para control de un motor de campo dividido

de servomecanismos de control de posición, el motor está acoplado mecánicamente al detector del error para poder restaurar la condición de equilibrio. El motor se detiene cuando alcanza una posición determinada por la posición del eje de mando, ya que la tensión del error se reduce a cero en esta situación.

En la figura 8-11 (A) se ilustra una forma de controlar un servomotor c.a. de dos fases. La polarización de corriente continua se ajusta de forma que los núcleos de las dos mitades del circuito se "disparen" a  $90^\circ$ .

Las bobinas de control están conectadas de forma que en una mitad de circuito se suma su efecto a la polarización y en la otra mitad se resta. La presencia de la corriente de control hace que los núcleos de una mitad del circuito se disparen antes y los núcleos de la otra mitad se disparen más tarde.

Así, pues, una mitad del circuito *conduce* y la otra mitad se *corta*. Como consecuencia de esto, uno de los dos bobinados de campo del motor queda efectivamente conectado a la entrada c.a., y el otro bobinado queda en serie con el capacitor cambiador de fase *C*. En la figura 8-11 (B) se muestra un circuito equivalente. En este circuito, el interruptor doble representa las dos mitades del circuito. Cuando el interruptor se encuentra en la posición que se muestra en la figura, el campo principal estará conectado a la fuente de

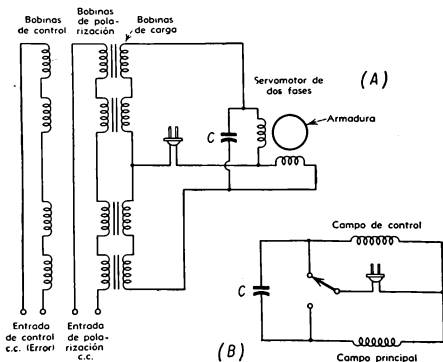


Fig. 8-11. Amplificador magnético para control de un servomecanismo de dos fases

c.a. y el capacitor quedará en serie con el campo de control. La posición del interruptor determina el sentido de giro del motor. De la misma forma, en la figura 8-11 (A), el sentido de giro está determinado según qué mitad del circuito está *conduciendo* y qué mitad está *al corte*. Como esto depende del sentido de la corriente en las bobinas de control conectadas en serie, la polaridad de la tensión del error determina el sentido de giro del motor.

Otro método para controlar un servomotor de dos fases es por medio del empleo de un transformador saturable. Como se indica en la figura 8-12, el transformador saturable tiene tres bobinados: primario, secundario y control. Aunque la representación esquemática muestra la bobina de control separada, se supone que las tres bobinas están arrolladas en el mismo núcleo. Cuando se

abre el interruptor, como en la figura 8-12 (A), el transformador trabaja como un transformador normal. El primario está conectado a una fuente de c.a. y la tensión inducida en el secundario depende de la relación de transformación. Sin embargo, cuando se cierra el interruptor, la acción de transformación desaparece. La corriente que circula por la bobina de control lleva al núcleo a la saturación y el flujo permanece constante en su valor

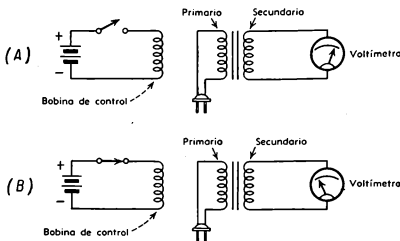


Fig. 8-12. El transformador saturable

máximo. Como el flujo no puede *variar*, no *corta* a las espiras del secundario. Como consecuencia de esto, no aparece tensión inducida en el secundario. Si se conecta una resistencia variable en serie con el bobinado de control, la corriente de control puede ajustarse para producir un determinado grado de saturación parcial del núcleo. De esta forma, se puede ajustar la tensión del secundario a un valor intermedio.

En la figura 8-13 se muestra el empleo de un transformador saturable para controlar un servomotor de dos fases. Cuando no hay señal del error de c.a. aplicada al transformador de acoplamiento  $T_1$ , los triodos  $V_1$  y  $V_2$  conducen igualmente (durante los semiciclos en que la excitación que proporciona el transformador  $T_2$  tiene la polaridad que se indica). Como los núcleos de los transformadores saturables  $T_3$  y  $T_4$  están saturados parcialmente e igualmente, las tensiones en los secundarios en las dos mitades del circuito son iguales. Como estos secundarios están conectados en serie y en oposición, la tensión resultante sobre el canipo de control del motor es cero. En estas condiciones el motor no gira. Las polaridades de los secundarios que se indican en la figura corresponden a un semiciclo. Durante el semiciclo opuesto las tensiones serán opuestas a las que se indican y seguirán anulándose.

Supongamos que se aplica una señal del error de c.a. a los terminales de entrada del circuito. La tensión inducida en los terminales del secundario

de  $T_1$  hace a una reja positiva y a la otra negativa. El triodo que tiene un potencial positivo en su reja (durante el semiciclo positivo de la tensión de alimentación de placa) aumentará su corriente de placa. El triodo que tiene un potencial negativo en su reja reducirá su corriente de placa. Como las bobinas de control c.c. de una de las mitades del circuito son recorridas por una corriente mayor que las bobinas de la otra mitad, uno de los transfor-

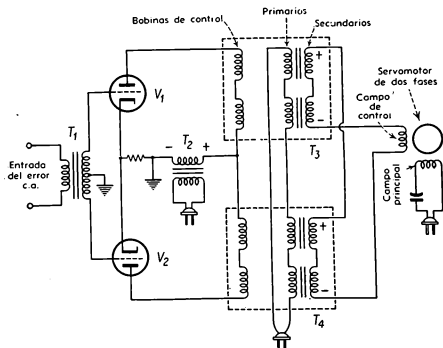


FIG. 8-13. Control de un servomotor por transformador saturable

madores ( $T_3$  o  $T_4$ ) quedará más saturado que el otro. En estas condiciones, las tensiones de los secundarios de las dos mitades de los circuitos no se anularán. La *diferencia* de tensión que aparece aplicada al campo de control del motor hace que éste gire. Téngase en cuenta que la polaridad de la tensión aplicada al bobinado del campo de control del motor depende de cuál de los transformadores,  $T_3$  o  $T_4$ , produzca más tensión en un instante determinado. Como esto depende de cuál de los dos triodos es más conductor, la fase de la señal del error determina el sentido de giro del motor.

En la figura 8-14 se muestra un amplificador magnético en push-pull de dos etapas. Un sincrotransformador de control, que se supone está conectado a un sincrotransmisor, proporciona una señal del error de c.a. Cuando existe una diferencia de ángulos entre los ejes de los rotores del transmisor y del transformador de control, aparece una señal del error de c.a. aplicada al



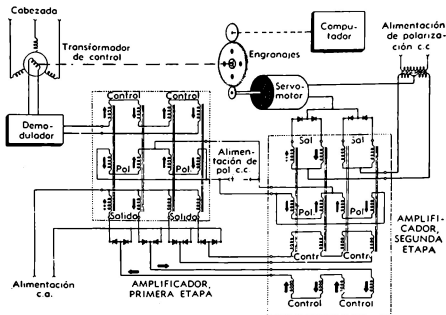


FIG. 8-14. Amplificador magnético de dos etapas. (Vickers Inc., Division of Sperry Rand Corp.)

desmodulador. La salida de tensión continua del desmodulador tiene una polaridad y una amplitud que depende de la dirección y magnitud del error angular entre los dos ejes de los rotores. Esta tensión continua se aplica a las bobinas de control de la primera etapa del amplificador magnético. Esta etapa es una versión en push-pull del amplificador magnético que se muestra en la figura 8-8.



FIG. 8-15. Amplificador magnético listo para conectar. (Acromag, Inc.)

Como las bobinas de control de la segunda etapa están conectadas como cargas de la primera, la corriente de control de la segunda etapa es mayor que la corriente de control de la primera. La segunda etapa es una versión en push-pull del circuito doblador que se muestra en la figura 8-6.

El campo de control del servomotor de dos fases está conectado como carga de la segunda etapa. El acoplamiento mecánico entre el eje del motor y el eje del rotor del sincrotransformador de control lleva al rotor de este último a una correspondencia angular con el rotor del sincrotransmisor. El acoplamiento mecánico del motor lleva, asimismo, información sobre la posición al computador. Este sistema ha sido diseñado para calcular los datos necesarios para describir eléctricamente la cabezada de un barco con relación al campo magnético de la tierra.

### SUMARIO

El amplificador magnético es eléctrica y mecánicamente robusto, y proporciona un servicio con una gran seguridad. Su componente principal es un núcleo de reactor saturable que funciona como una inductancia variable. La variación de la inductancia se produce como consecuencia de la variación del nivel de saturación del núcleo. A su vez, la saturación del núcleo está determinada por la magnitud de la corriente que circula por un bobinado de control. La corriente que circula por la carga, en serie con la reactancia, puede controlarse variando la corriente que circula por la bobina de control.

En el circuito de carga pueden conectarse diodos de tal forma que la corriente de carga contribuya a la saturación del núcleo. En este caso el amplificador magnético es *autosaturable*. Se pueden emplear diodos adicionales para la rectificación, si se desea tener c.c. en la carga. También pueden incluirse bobinas adicionales en la reactancia, para producir polarización o realimentación. Los amplificadores magnéticos pueden conectarse en cascada empleando la bobina de control de una etapa como carga de la etapa precedente.

En el transformador saturable, la corriente que circula por el bobinado de control determina el grado de saturación del núcleo y por tanto determina el valor de la tensión inducida en el bobinado secundario.

### PREGUNTAS

1. Citar una ventaja y un inconveniente del amplificador magnético comparado con un amplificador electrónico.
2. Si la corriente continua de control de un reactor saturable aumenta de valor, ¿aumentará o disminuirá la corriente en el circuito de carga?
3. ¿Cuál es el objeto del diodo en un amplificador magnético saturable de media onda?

4. En un amplificador magnético doblador, ¿la corriente en la carga es c.c. o c.a.?
5. ¿Cuál es el objeto de la corriente de *polarización* en un amplificador magnético?
6. Dibujar el diagrama del circuito de un amplificador magnético de tres etapas, empleando circuitos del tipo del que se muestra en la figura 8-8.
7. Describir el funcionamiento de un transformador saturable en las condiciones de corriente de control cero, y en las condiciones de corriente de control máxima.
8. Haciendo referencia a la figura 8-13, explicar cómo invierte el sentido de giro el servomotor cuando la señal del error invierte la fase.

## AMPLIFICADORES DEL ERROR: ROTATIVOS

## 9 - 1. Sistema Ward Leonard

En las aplicaciones de los servomecanismos en que se requiere pequeña, o moderada potencia, se emplean ampliamente los motores de c.c. de campo dividido y los motores de c.a. de dos fases. En aplicaciones de gran potencia, por ejemplo, para colocar en posición cargas pesadas, se emplean normalmente motores de c.c. Los amplificadores del error usados para controlar estos motores deben ser capaces de proporcionar una gran potencia. Para este objeto se emplean *amplificadores rotativos*. El sistema Ward Leonard representa este tipo de máquinas.

La figura 9-1 ilustra un sistema básico Ward Leonard. La tensión de salida de un generador de c.c. se aplica a la entrada de un motor de c.c.

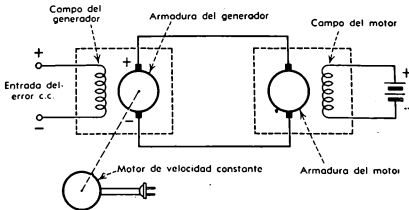


FIG. 9-1. Sistema básico Ward Leonard

Como el bobinado de campo del motor está alimentado por una fuente de c.c. constante, la velocidad y dirección del motor están determinadas por la magnitud y polaridad de la tensión aplicada a su armadura. Esta tensión es producida por un generador. La armadura del generador es movida por un

motor de velocidad constante, siendo su tensión de salida dependiente de la corriente de su campo. Como consecuencia de esta disposición, el motor es controlado por la tensión del error aplicada al bobinado de campo del generador. Supongamos, por ejemplo, que la tensión del error tiene la polaridad indicada en la figura 9-1. La corriente resultante que circula por el bobinado de campo del generador establece un campo magnético, y la armadura del generador gira en el interior de este campo. La tensión inducida en la armadura tiene la polaridad que se indica en la figura, y esta tensión se aplica a la armadura del motor. Como el campo y la armadura del motor están excitados, el motor gira.

Si la polaridad de la tensión del error hubiese sido contraria a la que se indica en la figura 9-1, la tensión inducida en la armadura del generador

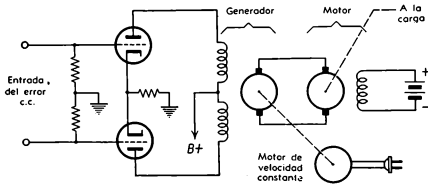


FIG. 9-2. Push-pull para control del generador

también hubiese sido de polaridad contraria. Como la excitación aplicada a la armadura del motor sería opuesta a la que se indica en la figura, el motor giraría en sentido contrario.

El bobinado de campo del generador puede tener una toma central para facilitar el funcionamiento con un push-pull, como se muestra en la figura 9-2. En este caso, las dos válvulas conducen corriente por las dos mitades del bobinado. Si las corrientes de placa son iguales (error cero), las dos mitades del bobinado de campo serán excitadas igualmente. El campo se anula y no aparece tensión inducida en la armadura del generador. Como la armadura del motor no recibe excitación, el motor no gira.

Si se aplica una tensión del error a los terminales de entrada, la rejilla de una de las válvulas se hará positiva y la de la otra negativa. La corriente que circula por una de las mitades del bobinado de campo del generador aumentará y la que circula por la otra mitad disminuirá. Las corrientes en las dos mitades del bobinado de campo no se anularán exactamente y aparecerá una tensión inducida en la armadura del generador. Esta tensión podrá tener una u otra polaridad, dependiendo de cuál de los dos tubos conduce

más corriente. Así, pues, la dirección de giro del motor depende de la polaridad de la tensión del error que se aplica a la entrada.

El circuito que se muestra en las figuras 9-1 y 9-2 necesita una tensión del error de c.c. Si la tensión del error es de c.a. (por ejemplo, cuando procede de un síncrono) puede usarse un circuito desmodulador para convertirla en c.c. Alternativamente, puede emplearse un amplificador de control como el que se muestra en la figura 9-3.

Supongamos que se aplica una tensión del error de c.a. al transformador de acoplamiento  $T_1$ , y que la polaridad en el secundario es la que se indica.

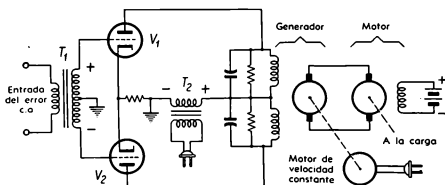


FIG. 9-3. Amplificador de control

En este caso, la reja de  $V_1$  es positiva y la de  $V_2$  negativa (durante el semiciclo de la alimentación en que las dos placas son positivas).  $V_1$  toma más corriente a través de una de las mitades del bobinado de campo del generador y  $V_2$  toma menos corriente a través de la otra mitad del bobinado. El desequilibrio de estas dos válvulas sobre el bobinado de campo hace que aparezca una tensión inducida en la armadura del generador. Esta tensión, aplicada a la armadura del motor, hace que el motor gire. Si la tensión del error aplicada a la entrada hubiese sido de fase opuesta, la reja de  $V_2$  hubiese sido positiva durante el semiciclo positivo de la tensión de placa. La corriente de placa de  $V_2$  habría sido mayor que la corriente de placa  $V_1$ . La tensión inducida en la armadura del generador habría sido de sentido opuesto y el motor habría girado en dirección contraria.

Como la tensión de alimentación de las placas es de c.a., la corriente circula solamente durante los semiciclos positivos de la alimentación. La corriente de placa es, por tanto, pulsatoria (media onda). Las resistencias y los condensadores conectados en paralelo con las mitades del bobinado de campo del generador actúan como filtros para aplanar los impulsos de corriente de campo.

En la figura 9-4 se muestra un servomecanismo que emplea un sistema

Ward Leonard. Un sincrotransmisor y un sincrotransformador de control actúan como detectores del error. El transformador de control produce una salida en c.a. (señal del error) determinada por la diferencia angular entre el eje de su rotor y el eje del rotor del transmisor. Esta señal del error de c.a. se aplica a un amplificador de control del tipo representado en la figura 9-3.

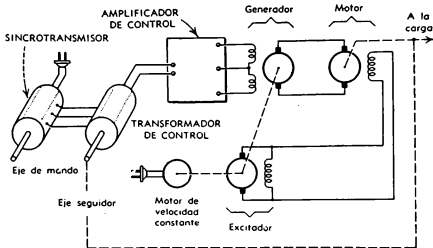


FIG. 9-4. Servomecanismo que emplea un sistema Ward Leonard

Como consecuencia de esto, una mitad del campo del generador queda más excitada que la otra mitad. La tensión inducida que resulta en la armadura del generador se aplica a la armadura del motor, haciendo que el motor gire. El motor lleva la carga a su posición y a su vez hace girar al eje del transformador de control síncrono. Cuando este eje alcanza una posición angular equivalente a la del eje del transmisor síncrono, la señal del error se hace cero y el motor se para.

El excitador que se muestra en la figura 9-4 es un generador de c.c. movido por un motor de velocidad constante que a su vez mueve el generador de c.c. principal. La salida en c.c. del generador excitador alimenta al campo del motor así como a su propio bobinado de campo.

## 9-2. Servomecanismos de velocidad

Todo servomecanismo puede considerarse como un instrumento de control de posición. Sin embargo, con ligeras modificaciones, puede emplearse para controlar la velocidad de un eje de salida en vez de la posición. Estos servomecanismos se conocen con el nombre de servos de *velocidad* y generalmente emplean un tacómetro para generar una tensión proporcional a la velocidad

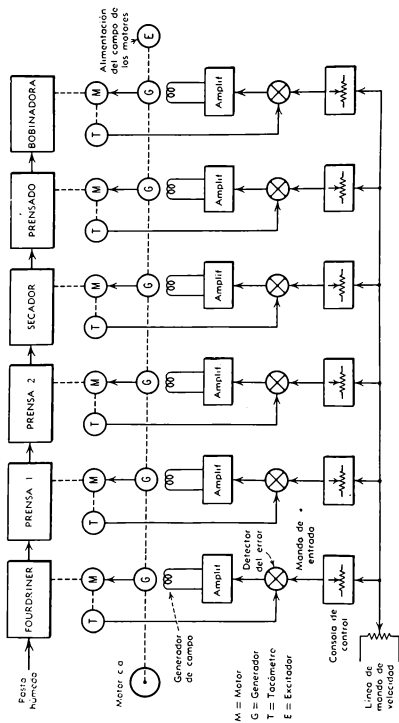


FIG. 9-5. Planta de fabricación de papel



del motor. La tensión del tacómetro se aplica a un detector del error, donde se compara con la tensión de mando de la entrada. La diferencia de tensión, si existe, es una señal del error que se emplea para corregir la velocidad del motor. La velocidad del eje de salida viene determinada por la magnitud de la tensión de mando. Para cada valor de la tensión de mando de la entrada hay un valor correspondiente de velocidad del motor.

El papel, el plástico, los tejidos y otros materiales se fabrican normalmente en forma de largas tiras que van pasando sucesivamente por un determinado número de procesos. Cada máquina realiza una operación por separado en la tira de material y cada máquina suele tener un motor individual. La velocidad de estos motores debe controlarse con precisión. Si una de las máquinas "tira" del material más de prisa que la máquina precedente, el material se deforma y puede romperse. Si uno de los motores es demasiado lento, el material se acumula entre dos máquinas. Esto no implica la necesidad de que todas las máquinas trabajen a la misma velocidad, sino solamente que la velocidad individual de cada máquina sea perfectamente controlada. La presión sobre la tira entre rodillos de acero, los valores normales de estirado y los cambios en los contenidos de humedad en los productos que se emplean en el proceso de fabricación, pueden producir variaciones en las dimensiones de la tira. La velocidad de cada máquina debe ser controlada separadamente y regulada cuidadosamente. Un ejemplo de este tipo de control y regulación se ilustra en la figura 9-5 y corresponde a una instalación de una fábrica de papel.

En la sección Fourdriner, la pasta húmeda se va colocando sobre una correa de tela metálica conocida con el nombre de grama. Unas cajas de succión extraen la mayor parte del agua, dejando una estera de fibras de madera. La estera pasa por unos rodillos de presión, donde pierde el agua que aún queda. En la sección de secado, la tira pasa sobre rodillos calentados y el contenido de humedad se reduce aún más. Los rodillos de prensado presionan el papel hasta el acabado deseado, y la tira se enrolla sobre grandes carretes.

Como se muestra en la figura 9-5, un motor de c.a. alimentado de la línea, conduce los generadores (uno por cada sección de la fábrica). Los motores de cada sección reciben la excitación para sus armaduras de los generadores asociados, y reciben la excitación de sus campos de un generador excitador conducido por el mismo motor que conduce los generadores principales. Un tacómetro acoplado a cada motor conductor, proporciona una tensión dependiente de la velocidad al detector del error de cada sección. De esta forma, cada motor es servorregulado a una velocidad constante. Si intenta cambiar la velocidad, la salida del tacómetro dejará de estar de acuerdo con la tensión de mando. La tensión de error alimentará la entrada del amplificador, variando la magnitud de la corriente de campo del generador. Como consecuencia de ello, la tensión de salida del generador variará, la excitación de la armadura del motor cambiará de acuerdo con este cambio y la velocidad del motor será corregida.

La tensión de mando de cada sección puede variarse desde el control de velocidad de línea o desde la *consola* de control. La consola de control permite ajustes individuales de velocidad en cada sección, y el control de línea permite acelerar o retardar la velocidad de toda la planta.

### 9 - 3. La amplidina

En la figura 9-6 se ilustra el empleo de un generador de c.c. como amplificador. La tensión de entrada se aplica al bobinado de campo del generador y la corriente que resulta fluye estableciendo un campo magnético. La armadura, movida por un motor de velocidad constante, gira en este

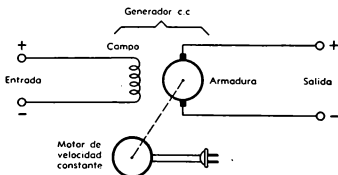


FIG. 9-6. Empleo de un generador c.c. como amplificador

campo magnético y es cortada por sus líneas de fuerza. De esta forma, aparece una tensión inducida en el bobinado de la armadura y esta tensión constituye la salida del generador.

Si se aumenta la tensión de entrada (fig. 9-6), se establece un campo magnético mayor. Como la armadura, que está girando, es cortada por un flujo mayor, la tensión inducida en ella aumenta. Este aumento de la tensión de salida ha sido producido por un aumento de la tensión de entrada. Si se conecta una carga entre los bornes de la armadura, la potencia desarrollada en esta carga puede controlarse variando la potencia de entrada en el bobinado del campo magnético. Como es posible controlar una gran potencia en la carga con una pequeña potencia aplicada a la entrada del bobinado de campo, el generador actúa como un amplificador. Pueden conectarse varios generadores en cascada para obtener un aumento de la amplificación. Esto se ilustra en la figura 9-7. En este caso, la salida de la armadura de la primera etapa se aplica a la entrada del bobinado de campo de la segunda. Una variación muy pequeña de la corriente de campo de la primera etapa produce una gran variación de la corriente en la carga.

La *amplidina* es un amplificador de dos etapas combinadas en una sola

máquina y empleando una sola armadura. En la figura 9-8, la entrada de c.c. al campo de control establece un flujo en cuyo interior gira la armadura (la armadura es movida separadamente por un motor de velocidad constante). De esta forma, se induce tensión en el bobinado de la armadura. Esta tensión, que aparece entre las escobillas *A* y *B*, es la salida del primer generador. Sin embargo, en este caso, *A* y *B* están en cortocircuito. La corriente de cortocircuito es relativamente elevada y establece un campo magnético

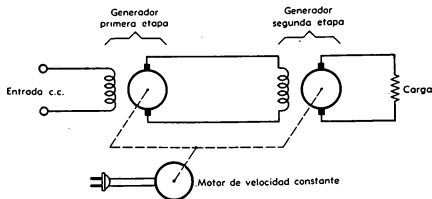


FIG. 9-7. Amplificador de dos etapas

intenso (campo de la segunda etapa). Este campo induce una tensión en la armadura giratoria. La tensión aparece entre las escobillas *C* y *D*, y constituye la salida de la segunda etapa.

Cuando se conecta una carga externa en el circuito de salida de la amplidina, como se muestra por la línea de trazos de la figura 9-8, la corriente en la carga recorre el bobinado de la armadura. Puede establecerse otro campo magnético y la dirección de este campo magnético es tal que anula parcialmente al campo de control de entrada. Para compensar este efecto, se incluye en la amplidina un *bobinado de compensación* que se conecta en serie con la carga. Realmente esto constituye un bobinado de realimentación. Un aumento de corriente en la carga aumenta el campo de compensación, el cual a su vez ayuda al campo de control a incrementar más la corriente en la carga. Un pequeño aumento del control de entrada aumentará más aún el valor de la corriente en la carga. La ganancia de potencia se encuentra comprendida entre 5.000 y 10.000 en las amplidinas típicas.

En la figura 9-8 solamente se muestra un bobinado de control, pero pueden disponerse varios bobinados para poder controlar la amplidina desde varias fuentes de control distintas. Uno de estos campos, conocido con el nombre de *campo de referencia*, establece el valor del nivel de salida de la amplidina. Los otros campos de control aumentan o reducen la salida de acuerdo con el valor del error en el sistema.

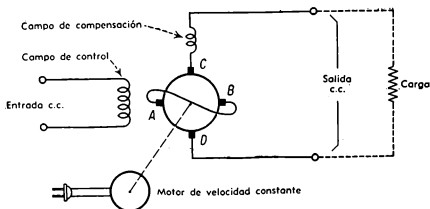


FIG. 9-8. La amplidina

En la figura 9-9 se muestra un servomecanismo que emplea una amplidina. Esto constituye un sistema de control de lazo cerrado que mantiene la velocidad de un motor de c.c. en un valor constante.

La tensión de la armadura del motor la suministra un generador de c.c. y el campo de este generador es excitado por la amplidina. La amplidina tiene dos campos de control conectados de forma tal que uno es opuesto al otro. La corriente por el campo de *referencia* establece la velocidad básica del motor. El otro campo de control se excita por un tacómetro acoplado mecánicamente al eje del motor de c.c. El tacómetro es un pequeño generador y su tensión de salida es función de la velocidad del motor de c.c.

La acción correctiva del error en este circuito tiene lugar de la forma

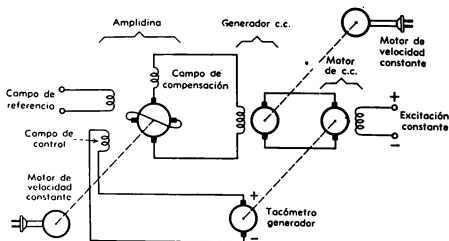


FIG. 9-9. Sistema de control con amplidina

siguiente. Si la velocidad del motor de c.c. aumenta, el tacómetro produce una tensión de salida mayor. La corriente en el campo de control de la amplidina aumenta. Como el campo de control se opone al de referencia, el campo resultante en la amplidina es menor que el que había anteriormente. Con una entrada menor la amplidina proporciona menos salida para alimentar el bobinado de campo del generador de c.c. La salida del generador disminuye reduciendo la excitación a la armadura del motor de c.c. Como resultado final, el motor de c.c. reduce su velocidad al valor original.

### SUMARIO

Los servomotores de c.c. y de c.a. convencionales se emplean para llevar a posición cargas ligeras o moderadas. Para el control de cargas pesadas se emplean grandes motores de c.c. En estas aplicaciones, el motor se controla mediante un generador cuya salida varía de acuerdo con la señal del error. Un sistema típico de control es el sistema Ward Leonard. En él, la señal del error controla el sentido y magnitud de la corriente de campo del generador. La magnitud y la polaridad de la tensión de salida del generador es, por tanto, función de la señal del error. Como la salida del generador se aplica como excitación de la armadura de un motor de c.c., la velocidad y el sentido de giro de este motor quedan controlados de acuerdo con el error del sistema.

Un generador de c.c. puede funcionar como un amplificador de potencia, ya que una pequeña variación de la corriente de campo produce una gran variación en la salida del generador. La salida del generador puede aplicarse como excitación del campo de un segundo generador, obteniéndose de esta forma un amplificador de dos etapas. La amplidina es un generador de este tipo, de dos etapas, combinadas en una misma máquina. La tensión de error se aplica al campo de control y determina la tensión de salida de la amplidina. La salida controla un motor de c.c. que pone la carga en posición.

### PREGUNTAS

1. Explicar, con referencia a la figura 9-1, cómo un aumento de la tensión del error produce un aumento de la velocidad del motor.
2. Explicar, con referencia a la figura 9-1, cómo una inversión de la polaridad del error produce una inversión en el sentido de giro del motor.
3. ¿Conduce la válvula  $V_2$  durante el semiciclo en que la tensión es positiva, como se muestra en la figura 9-3? Explíquese.
4. Supóngase, en la figura 9-4, que un giro del eje de mando en el *sentido de las manecillas de un reloj* produce un giro del eje seguidor en el *sentido contrario a las manecillas de un reloj*. Explicar tres formas de corregir este defecto.

5. ¿Cuál es el objeto del bobinado de compensación en una amplidina?
6. Supóngase que el motor de c.c. de la figura 9-9 aumenta su velocidad debido a una reducción de la carga mecánica conectada a su eje. Explicar cómo funciona el circuito para llevar de nuevo al motor a su velocidad original.

## ESTABILIDAD DE LOS SERVOMECANISMOS

## 10 - 1. Introducción

En el caso ideal, un servomecanismo debe mantenerse en la condición de error cero, independientemente de la velocidad o del tipo de variación que tenga la entrada. En todo instante la salida debe estar en correspondencia con la entrada. En la práctica, esta situación ideal puede aproximarse, pero no puede llegar a realizarse totalmente debido a que la acción correctora no ocurre hasta que existe un error real en el sistema. Sin embargo, puede conseguirse una característica muy próxima a la ideal, si el servomecanismo tiene: (1) una alta sensibilidad de forma que responda a errores muy pequeños; (2) una gran velocidad de respuesta, de forma que los errores se corrijan rápidamente, y (3) estabilidad, de forma que el sistema no oscile. El último de estos requerimientos es el más difícil de conseguir. Los otros dos

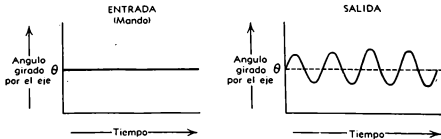


FIG. 10-1. Oscilación sostenida

pueden conseguirse empleando: (1) un servoamplificador de gran ganancia, y (2) un servomotor de gran potencia con una reducción de engranajes mínima en su acoplamiento con la carga. Esta combinación de gran ganancia y velocidad tiende sin embargo a producir una mayor oscilación e inestabilidad. En la práctica debe sacrificarse la sensibilidad y la velocidad para mejorar la estabilidad del sistema.

Una forma de inestabilidad a la que son sensibles los servomecanismos es la oscilación sostenida. Cuando existe este tipo de inestabilidad, el eje de salida se mueve a uno y otro lado de la posición deseada, aun cuando el eje de entrada se encuentre estacionario. Una causa común con esta oscilación es un gran tiempo de retardo en el sistema. Como el servomecanismo no puede responder en un tiempo nulo a las variaciones de la entrada, la acción correctiva se retrasa con respecto a las variaciones del eje de mando. Como consecuencia de este retardo de tiempo, la acción correctiva continúa actuando, aun cuando el error se haya reducido a cero. Así, pues, el sistema corrige por más, iniciando una corrección en sentido contrario, corrigiendo por más de nuevo, y así sucesivamente. Como se indica en la figura 10-1 el eje de salida oscila alrededor de la posición angular deseada  $\theta$ .

En la figura 10-2 se ilustra otra forma de inestabilidad menos severa que la oscilación sostenida. Si se aplica una entrada del tipo de la función *paso* al servomecanismo (el eje de mando gira instantáneamente desde el

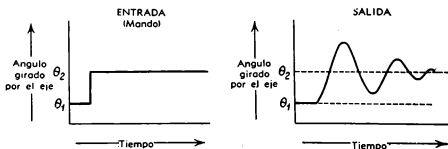


FIG. 10-2. Sobreimpulso excesivo

ángulo  $\theta_1$  hasta el ángulo  $\theta_2$ ), el eje de salida variará su posición en la forma que se muestra en la figura 10-2 (B). Como consecuencia de la corrección por más, el eje de salida gira más allá de la posición deseada  $\theta_2$ . Se inicia una corrección en sentido opuesto y el eje gira en sentido contrario. Como consecuencia de la corrección por más, el eje gira hasta más allá de  $\theta_2$  (aunque una cantidad menor que lo que sobrepasó anteriormente). Los sobreimpulsos sucesivos van siendo menores en amplitud y el eje de salida queda finalmente en la posición angular  $\theta_2$ .

## 10 - 2. Amortiguamiento

El amortiguamiento se emplea en los servomecanismos para evitar un sobreimpulso o una oscilación sostenida excesivos. El amortiguamiento puede conseguirse por medio de un dispositivo de fricción mecánica conectado al eje de salida, o también puede producirse por medios eléctricos.

La magnitud del amortiguamiento empleado debe ser suficiente para



evitar un sobreimpulso excesivo, del tipo que se indica en la figura 10-2. Sin embargo, un amortiguamiento excesivo reduce la velocidad con que se produce la corrección del error. En la figura 10-3 se muestran varios grados de amortiguamiento. Se supone que el eje de entrada se ha movido instantáneamente desde  $\theta_1$  hasta  $\theta_2$  (función "paso"). Las curvas *A*, *B* y *C* representan el movimiento del eje de salida para tres grados diferentes de amortiguamiento. Si el sistema está *subamortiguado* (curva *A*), el error se corregirá rápidamente, pero aparecerá un pequeño sobreimpulso. Si el

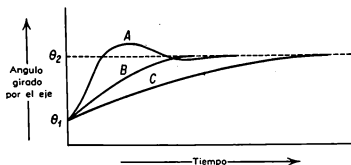


FIG. 10-3. Ligero subamortiguamiento, amortiguamiento crítico y sobreamortiguamiento.

sistema está *amortiguado críticamente* (curva *B*), no aparecerá sobreimpulso, pero transcurrirá más tiempo antes que el eje de salida alcance la posición  $\theta_2$ . Si el sistema está *sobreamortiguado* (curva *C*), el eje de salida se aproximará a  $\theta_2$  más lentamente. Como consecuencia de esta lentitud de la acción correctiva, no es deseable el sobreamortiguamiento. En la práctica se emplea frecuentemente un pequeño subamortiguamiento. Puede tolerarse un pequeño sobreimpulso con tal de obtener una corrección del error que sea rápida.

Para conseguir el grado de amortiguamiento deseado se emplean dispositivos de fricción. Por ejemplo, una rueda de paletas girando en una cámara llena de aceite se puede acoplar al eje de salida. Una desventaja de este tipo de amortiguador es que consume potencia del servomotor y es necesario emplear un motor de mayor potencia. Otra desventaja de este tipo de amortiguamiento es que introduce un *error de velocidad*. Si el eje de entrada gira a una velocidad constante, el eje de salida lo seguirá a una velocidad constante pero retrasada en posición con respecto al eje de entrada. Estas desventajas pueden reducirse empleando un *amortiguador de inercia*.

El diseño de un amortiguador de inercia se hace de tal forma que la fricción es mínima cuando el eje está girando a una velocidad constante. El error de velocidad se reduce y el eje de salida puede seguir, a velocidad constante, muy aproximadamente al eje de entrada. Sin embargo, un aumento rápido de la velocidad del eje encontrará una oposición por un aumento de fricción en el amortiguador de inercia. Este aumento de fricción

evita el sobreimpulso y la oscilación sostenida. Un tipo de amortiguador de inercia consiste en un disco de metal, una pieza de fieltro y una rueda libre. El fieltro se encuentra entre el disco y la rueda libre y el disco está montado en el eje del motor. Cuando el motor está girando a velocidad constante, el movimiento de rotación se transmite a través del fieltro a la rueda libre. La rueda libre gira a la misma velocidad que el disco. Como la rueda libre tiene una masa relativamente grande, no puede cambiar su velocidad rápidamente. Un cambio brusco de la velocidad del motor hará que la rueda libre resbale con respecto al disco. Como ahora el disco y la rueda libre giran a distinta velocidad, la fricción del fieltro se opone a un cambio brusco de la velocidad del motor. Un muelle que ajusta la presión que se ejerce sobre el fieltro permite variar el grado de amortiguamiento.

Un tipo de amortiguador que simula el efecto de fricción mecánica es el *amortiguador por corrientes de pérdida*. Un tipo de amortiguador de esta clase consiste en un disco de cobre que gira en un campo magnético. El disco de cobre está acoplado al eje del motor o al eje de salida del servomecanismo y el campo magnético se establece por medio de un imán permanente o por medio de un bobinado de campo. En cualquiera de los dos casos, el giro del disco de cobre en el campo magnético hace que se induzcan en él corrientes de pérdida. Estas corrientes generan un campo magnético de tal polaridad que se opone al giro del disco. Así, pues, se genera una fuerza de retardo que simula el efecto de una fricción viscosa; es decir, la fuerza de retardo es proporcional a la velocidad de rotación del eje.

Una variación de amortiguador por corrientes de pérdidas consiste en un imán permanente que está montado de forma que pueda girar libremente. Cuando el eje de salida gira a una velocidad constante, el disco de cobre y el imán giran a la misma velocidad. Como el disco no *corta* al campo magnético del imán, no se produce fuerza retardadora. Cuando la velocidad del eje cambia bruscamente, la masa relativamente grande del imán no puede seguir el cambio de velocidad. Como consecuencia, existe un movimiento relativo entre el disco y el imán que produce corrientes inducidas en el disco. Por tanto, se produce una fuerza de retardo que evita un sobreimpulso y una oscilación sostenida excesivos.

El servomotor proporciona por sí mismo parte del amortiguamiento requerido por un servomecanismo. Muchas veces se incluye un amortiguador de fricción o de corrientes de pérdida en el interior de la carcasa del motor. Asimismo, la fricción de los cojinetes del motor proporcionan un cierto amortiguamiento. Además, el motor produce un amortiguamiento eléctrico. En el caso de un motor de c.c., el amortiguamiento eléctrico se produce como resultado de la tensión inducida en la armadura cuando corta las líneas de fuerza que establece el bobinado de campo. Esta tensión es de tal polaridad que se opone a la tensión de excitación de la armadura que proporciona el *servoamplificador*, el generador de c.c. o la *amplidina*. Como la tensión *opuesta* inducida en la armadura es proporcional a la velocidad de giro de la misma, se produce un efecto equivalente a una fricción viscosa. En el caso

de un servomotor de c.a. (dos fases), el efecto de amortiguamiento eléctrico es debido a las característica velocidad-par del motor. En estos motores el par disminuye al aumentar la velocidad; es decir, que el motor se hace "menos potente" a velocidades elevadas. Como el par motor que arrastra la carga se hace menor al aumentar la velocidad, el efecto es similar a un amortiguamiento viscoso.

### 10-3. Control por variación de la salida

La realimentación se emplea normalmente en los servomecanismos para producir un efecto de amortiguamiento, evitando la necesidad de una fricción mecánica para reducir la oscilación mantenida. En la figura 10-4 se muestra un dispositivo de este tipo. El sincrotransformador de control actúa como detector del error para comparar la posición del eje de salida y del eje de entrada, (representados por las tensiones que definen la posición de un sincrotransmisor). De acuerdo con la diferencia de posición entre el eje de

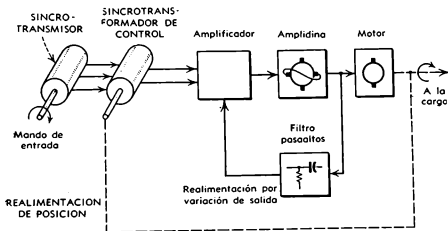


FIG. 10-4. Control por variación de la salida

entrada y el de salida, el transformador de control envía una señal de error al amplificador. El amplificador, a su vez, controla la amplidina que proporciona excitación a la armadura del motor de c.c. que lleva la carga a posición. Además de la realimentación de posición (acoplamiento mecánico de la salida con el transformador de control), el circuito utiliza realimentación por variación de la salida. La tensión de salida de la amplidina —que corresponde a una velocidad del motor— se lleva, a través de un filtro pasaaltos, al amplificador del error. Esta realimentación es negativa, oponiéndose al efecto de la señal del error, produciendo por tanto un efecto de amortiguamiento. Si el eje de entrada girase instantáneamente a una nueva

posición, el transformador de control enviaría una señal de error al amplificador. Así, pues, la amplidina proporciona tensión al motor de c.c. y hace que el motor gire. Sin embargo, el aumento de la tensión de salida de la amplidina, se realimenta para oponerlo al efecto de la señal del error. Como la señal del error queda efectivamente reducida, se evita que el motor acelere tan rápidamente que produzca un sobreimpulso excesivo. La realimentación

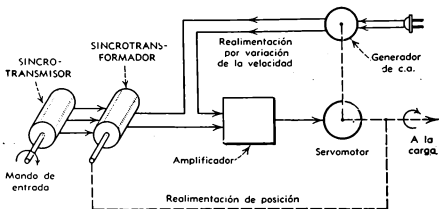


FIG. 10-5. Control por variación de velocidad empleando un generador de c.a.

por variación de la salida se denomina a veces realimentación por la derivada, y simula el efecto de un amortiguador de inercia; es decir, se opone a las variaciones bruscas de posición del eje.

El filtro pasaaltos de la figura 10-4 reduce el error de velocidad evitando la realimentación cuando la tensión de la amplidina es constante. Si el eje de entrada está girando a una velocidad constante, la tensión de salida de la amplidina permanece constante. Como esta tensión de c.c. constante no puede pasar por el filtro pasaaltos, no se produce efecto de amortiguamiento. El eje de salida puede seguir perfectamente el giro a velocidad constante del eje de entrada.

La figura 10-5 ilustra otra técnica para llevar a cabo una acción correctiva proporcional al *valor* del error y a la *variación de velocidad* del eje de salida. La realimentación se lleva a cabo por medio de un acoplamiento mecánico entre el eje de salida y el transformador de control. La realimentación por variación de velocidad se realiza por medio de un generador. Este generador de c.a. es arrastrado por el servomotor, y su tensión de salida es proporcional a la velocidad de giro de su eje. La excitación para este generador se obtiene de la misma fuente de alimentación que proporciona la excitación de los síncronos. La salida del generador permanece constante a la frecuencia de excitación, varía en amplitud de acuerdo con la velocidad del eje e invierte su fase cuando se invierte el sentido de giro. La señal del

generador se realimenta en oposición con la señal del error que proviene del transformador. Como un aumento momentáneo de la velocidad del eje produce un aumento de la salida del generador, la señal del error se reduce de forma tal que se evita un sobreimpulso excesivo.

Un inconveniente del empleo del generador de c.a. es que la realimentación tiene lugar incluso cuando el servomotor está girando a velocidad constante. El efecto de amortiguamiento resultante hace que el eje de salida se retrase con respecto al eje de entrada (error de velocidad) cuando éste gira a una velocidad constante. Por esta razón se emplea a menudo un generador de c.c. En la figura 10-6 se muestra un sistema que emplea un

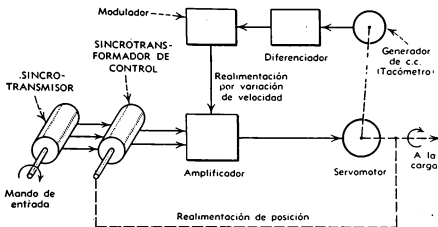


FIG. 10-6. Control por variación de velocidad empleando un generador de c.c.

generador tacométrico de c.c. En este caso, la realimentación de velocidad se emplea en conjunción con una realimentación positiva. La salida de c.c. del generador varía de acuerdo con la velocidad del eje. Como esta tensión dependiente de la velocidad se aplica por realimentación a través de un diferenciador, la realimentación se evita, por medio del bloqueo del capacitor, cuando la tensión de generador permanece constante. El efecto de amortiguamiento se elimina cuando el eje de salida está girando a una velocidad constante en respuesta a una velocidad de giro constante del eje de entrada. De esta forma, se reduce el error de velocidad. Sin embargo, un cambio momentáneo de la velocidad del eje, produce el correspondiente cambio en la tensión de salida del generador. Este cambio de tensión se acopla por medio del diferenciador al modulador. El modulador, que puede ser de varilla vibrante o un equivalente electrónico, convierte la señal en c.a. a la frecuencia de la señal del sincrónico. Esta realimentación se opone a la señal del error en el transformador de control y por tanto se opone a un cambio brusco de la posición de salida. En los sistemas que emplean un detector del error

cuya salida es de c.c., no se requiere el modulador que se muestra en la figura 10-6.

El generador de c.c. es más complicado mecánicamente que el generador de c.a. porque requiere escobillas y un colector. Por esta misma razón el ruido presente a su salida es mayor que en el generador de c.a.: su salida puede ser bloqueada por un capacitor durante el funcionamiento a velocidad constante y su salida es cero cuando la velocidad de su eje es nula. Por el contrario, el generador de c.a. produce una pequeña salida (nulo) cuando su eje permanece estacionario. El generador de c.a. está formado por dos bobinados y un rotor sólido en forma de copa. El rotor sirve como medio de acoplamiento entre el bobinado de entrada (excitado) y el bobinado de salida. Frecuentemente los generadores de c.c. emplean imanes permanentes pero algunos modelos tienen *bobinados* de campo.

#### 10 - 4. Control por variación del error

En un método de estabilización empleado recientemente, la acción correctiva se hace proporcional al valor del error y al valor de la variación del error. Esta forma de estabilización, llamada control por *error más su variación*, aumenta el efecto de amortiguamiento para evitar que la salida se aproxime a su valor final demasiado rápidamente. De esta forma se elimina un sobreimpulso y una oscilación mantenida excesivos.

La estabilización por variación del error se ilustra en la figura 10-7. Como se ve en la figura hay conectado un circuito *RC* entre el detector del error y el amplificador. Cuando existe un error en el sistema, el cursor del potenciómetro de mando y el del potenciómetro seguidor difieren en posición. La diferencia de potencial entre estos dos cursores es la señal de error que se aplica al circuito *RC*. Los resistores  $R_1$  y  $R_2$  constituyen un divisor de tensión, y la parte de la tensión del error desarrollada en  $R_2$  se aplica al amplificador. La entrada del amplificador del error es, por tanto, proporcional al *valor* del error en el sistema. El capacitor  $C$  se carga a la tensión que hay en bornes de  $R_1$ , cuando varía el valor del error. El capacitor  $C$  se carga o descarga según que el error aumente o disminuya. Esta carga (o descarga) origina una corriente que produce una caída de tensión en  $R_2$ . La tensión total en bornes de  $R_2$  está formada por dos componentes: una proporcional al valor del error y otra proporcional a la velocidad de variación del mismo.

Un aumento del error (por ejemplo, cuando el eje de entrada se mueve a una nueva posición) hace que el capacitor  $C$  se cargue. La corriente de carga aumenta la caída de tensión en  $R_2$ , resultando una entrada mayor en el amplificador. La acción correctiva es, por tanto, exagerada cuando el error del sistema aumenta. Esto permite que la salida acelere rápidamente. Cuando la salida empieza a "coincidir" con la entrada, el error disminuye. Como la salida del detector del error se hace menor, el capacitor  $C$  se descarga. La corriente de descarga tiene tal sentido que reduce el valor de la tensión en  $R_2$ .

La acción correctiva va siendo disminuida a medida que el error se aproxima a cero, evitándose de esta forma un sobreimpulso excesivo.

Desde otro punto de vista, el circuito RC de la figura 10-7 puede considerarse como un circuito cambiador de fase, cuya salida conduce su entrada.

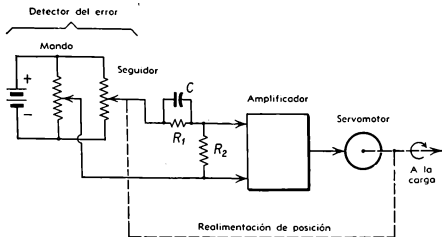


FIG. 10-7. Control del error más su variación

La señal de error conductora compensa el tiempo de retardo inherente al servomecanismo, mejorando la estabilidad del sistema. Por esta razón el circuito RC suele denominarse a veces circuito avanzador.

El circuito RC que se muestra en la figura 10-7 funciona con una señal del error en c.c. En los servomecanismos que emplean detectores del error que producen una tensión alterna (por ejemplo, síncronos o transformadores diferenciales) es necesario un circuito RC diferente. La señal del error que se muestra en la figura 10-8 (A) corresponde a un error constante pequeño. La frecuencia de la onda senoidal es igual a la frecuencia de excitación, normalmente 50, 60, 400 ó 1.000 ciclos por segundo. La señal del error puede estar en fase o en oposición de fase con la excitación, según sea el sentido del error. La figura 10-8 (B) representa un error mayor aunque también constante. En un servomecanismo real, el error no permanece constante (excepto el error de velocidad) debido a la acción correctiva del sistema que tiende a reducirlo a cero. La figura 10-8 (C) es la representación más clásica del error. Durante el intervalo de tiempo representado, el error aumenta al principio y después (como consecuencia de la acción correctiva) disminuye hacia cero. La señal del error es, por tanto, una onda modulada y la envolvente de modulación representa la variación del error. Esta forma de onda contiene frecuencias laterales separadas por encima y por debajo de la portadora (excitación) igual cantidad. Por ejemplo, si la frecuencia de excitación es de 400 ciclos por segundo, y el error varía a un promedio que

corresponde a 5 ciclos por segundo, las frecuencias laterales serán de 395 y de 405 ciclos por segundo respectivamente. Si la señal del error varía más rápidamente, por ejemplo, a una frecuencia de 10 ciclos por segundo, las frecuencias laterales serán 390 y 410 ciclos por segundo.

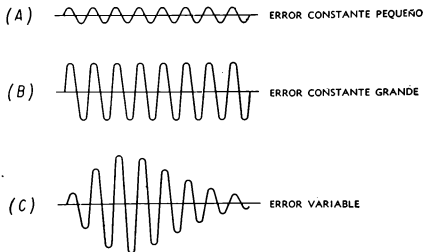


FIG. 10-8. Señales del error en c.a.

Como una variación rápida del error produce unas frecuencias laterales más alejadas de la portadora o frecuencia de excitación, puede emplearse un circuito *RC* de configuración adecuada para producir una salida proporcional

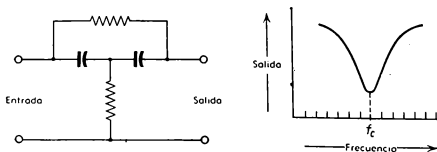


FIG. 10-9. Circuito Puente T

a la variación a que está cambiando el error. En la figura 10-9 se muestra un circuito de este tipo. La característica de transferencia de este circuito *Puente T* se muestra también en la misma figura. Los valores de las resis-



tencias y capacitancias se seleccionan de tal forma que el circuito produzca máxima atenuación a la frecuencia de la portadora  $f_c$ . Las frecuencias alejadas de la portadora se atenúan menos que las frecuencias más próximas a ella. Un circuito Puente T conectado entre el detector del error y el amplificador de un servomecanismo, producirá mayor salida durante las variaciones rápidas del error. Como la entrada del servoamplificador es mayor cuando el error está aumentando rápidamente, la acción correctiva se exagera para aumentar la salida también rápidamente. Cuando el error empieza a

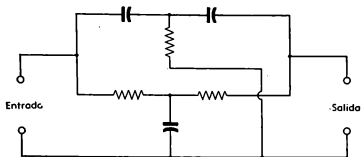


FIG. 10-10. Circuito Paralelo T

disminuir, la variación más lenta del error produce frecuencias laterales más cercanas a la portadora. Estas se atenúan más en el circuito Puente T, de forma que la acción correctiva se reduce. Como consecuencia de todo esto, el sistema tiende a anular el error sin una tendencia al sobreimpulso excesivo.

En vez del circuito Puente T, puede usarse el circuito *Paralelo T* (figura 10-10). Lo mismo que el circuito Puente T, este circuito produce una atenuación máxima a la frecuencia de la portadora y una atenuación progresivamente menor para las frecuencias laterales más alejadas de la portadora. Por tanto, la salida de este circuito es mayor cuando la señal del error está cambiando rápidamente. El circuito Paralelo T está formado por un filtro pasaaltos con un filtro pasabajos en paralelo. Las frecuencias laterales por encima y por debajo de la portadora pasan más fácilmente por el filtro pasaaltos y por el pasabajos respectivamente.

## 10 - 5. Control integral

El error en un servomecanismo debe exceder un nivel determinado antes que el servomotor desarrolle el par suficiente para poder vencer la fricción del sistema. Por esta razón, aparece un error de velocidad: el eje de salida se retrasa respecto al eje de entrada cuando el eje de entrada está girando a una velocidad constante. Esto es cierto si la fricción es la inherente al servomotor y al dispositivo de acoplamiento, producida por un dispositivo de fricción mecánica o estimulada eléctricamente. El propósito del control

integral es disminuir lo más posible el error de velocidad. Con esta forma de control, denominada a veces control de *restablecimiento*, la señal del error es preproporcional al tiempo que ha existido el error. Un error de gran duración produce un aumento de la señal del error y por tanto exagera la acción correctiva.

El control integral se lleva a cabo por medio de un circuito *RC* (integrador) conectado entre el detector del error y el servoamplificador. En la figura 10-11 se muestra un circuito de este tipo. Suponiendo que existe un

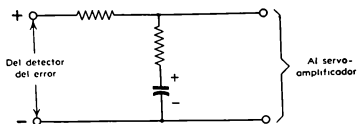


FIG. 10-11. Integrador

error en el sistema, el detector del error proporcionará una tensión de entrada al circuito integrador. Esta tensión puede ser de una u otra polaridad, dependiendo de la dirección del error. En cada caso, el capacitor de la figura 10-11 se cargará hacia el valor de la tensión del error. La entrada del servoamplificador aumentará con el tiempo y la acción correctiva será exagerada en proporción al intervalo del tiempo que ha durado el error. Como la salida del circuito integrador aumenta con el tiempo, este tipo de circuito *RC* se denomina a veces circuito de *retardo*.

Con referencia a la figura 10-11, se supone que el detector del error produce una salida en tensión continua (por ejemplo, un par de potenciómetros conectados a una fuente de c.c.). Si el detector del error es un sincrónico, un transformador diferencial o cualquier otro dispositivo de c.a., es necesario emplear otro circuito distinto. Este circuito deberá de producir una atenuación mínima a la frecuencia de la portadora (excitación), y una atenuación progresivamente mayor a las frecuencias laterales más alejadas de la portadora. Un error constante o que varía lentamente (bandas laterales próximas a la portadora) producirá una acción correctiva exagerada. Sin embargo, el empleo de este circuito supone que la frecuencia de excitación no sufre desplazamiento. Un desplazamiento de la frecuencia de excitación afectará al funcionamiento del servomecanismo. Por esta razón, en la práctica suele rectificarse la señal del error de c.a. y aplicar la c.c. resultante a un circuito del tipo representado en la figura 10-11. También puede emplearse un modulador para volver a convertir en c.a. la señal del error y aplicarla al servoamplificador.

El control integral es más efectivo para errores constantes o de una

variación lenta. Las variaciones rápidas del error las "ignora" el integrador, porque la carga del capacitor permanece prácticamente constante durante estos cambios rápidos; es decir, que la constante de tiempo no permite que el capacitor se cargue y se descargue tan rápidamente como varía el error. El control integral complementa al control por variación del error, y normal-

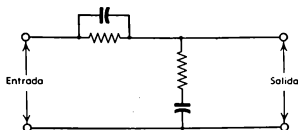


FIG. 10-12. Circuito RC que combina control por variación del error y control integral

mente se emplean los dos en combinación. El control por variación del error estabiliza al servomecanismo con relación a variaciones bruscas del error, y el control integral reduce el error de velocidad. En la figura 10-12 se muestra una combinación de circuito de variación del error y circuito integrador. El uso de estas dos formas de control, en unión de una fricción viscosa, conduce a un sistema de alta estabilidad.

## SUMARIO

Las técnicas de estabilización que se emplean en los servomecanismos permiten un aumento de la ganancia del amplificador (mayor sensibilidad) sin introducir oscilación. Los amortiguadores por fricción o por corrientes inducidas, o ambos, se utilizan para evitar un sobrepulso excesivo. Sin embargo estos amortiguadores reducen la velocidad de corrección e introducen un error de velocidad.

El control por variación de la salida produce un efecto de amortiguamiento que aumenta en proporción con la velocidad de variación del eje de salida. Se puede generar una tensión dependiente de la velocidad por un generador de c.a. o de c.c. conducido por el servomotor. Cuando se emplea un generador de c.c. es necesario utilizar un capacitor de bloqueo para reducir el efecto de amortiguamiento durante el tiempo de giro a velocidad constante.

El control por variación del error hace que la acción correctiva sea proporcional a la velocidad de variación del error. Un aumento de la variación del error acelera la acción correctiva y una disminución de la misma hace que la acción correctiva sea más lenta, evitando un sobrepulso

excesivo. El control integral reduce el error de velocidad, haciendo que la acción correctiva sea proporcional al intervalo de tiempo en que existe el error. Frecuentemente se usan en combinación el control por variación del error y el control integral.

### PREGUNTAS

1. ¿Cuál es la ventaja de un ligero subamortiguamiento en un servomecanismo en comparación con un amortiguamiento crítico?
2. ¿Qué se entiende por "oscilación"?
3. Citar dos inconvenientes del empleo de un dispositivo de fricción del tipo de rueda de paletas en cámara de aceite.
4. Definir qué es *amortiguamiento viscoso*.
5. Citar una ventaja del generador de velocidad de c.a. en relación con el de c.c.
6. Citar una ventaja del generador de velocidad de c.c. con relación al de c.a.
7. Explicar cuál es el objeto del "capacitor de bloqueo" que se emplea con un generador de velocidad de c.c.
8. Comparar los efectos del control por variación de la velocidad de salida y del control por variación del error durante un aumento rápido del error.
9. Con relación a un detector del error que produce una salida en c.a., tal como un síncrono, describir la relación entre la frecuencia de la portadora, las frecuencias de las bandas laterales y la velocidad de variación del error.
10. ¿Qué ventaja tiene el empleo del control integral?

## CAPITULO 11

### APLICACIONES

#### 11 - 1. Introducción

Las técnicas de los servomecanismos se emplean ampliamente en la industria para medir, registrar y controlar variables tales como temperatura, presión, variación de flujo, tensión, posición, velocidad, etc., etc. En algunas aplicaciones los equipos están diseñados para poder registrar el valor de la variable; en otras aplicaciones, los equipos *controlan* al mismo tiempo que registran. El sistema registrador se compone normalmente de una pluma de

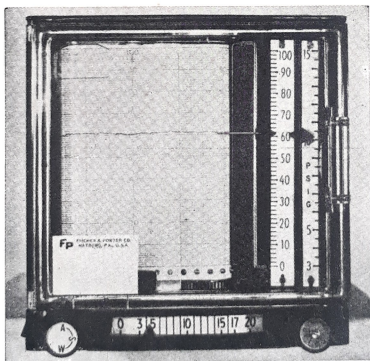


FIG. 11-1. Registrador industrial. (Fischer and Porter Co.)

poco peso que traza una línea sobre una banda de papel móvil. Esta traza es un gráfico que representa la variable en función del tiempo. En la figura 11-1 se muestra una estación de control y registro industrial. La variable que se trata de controlar se representa y registra sobre una carta de unos diez centímetros de ancho. En los modelos de dos plumas se cuenta con una pluma adicional para hacer un registro separado.

Los registradores electrónicos, conocidos por los nombres de registradores autobalancados, potenciométricos y registradores buscadores de nulo, varían solamente en detalles de sus circuitos, pero todos se fundan en el mismo principio básico. Por medio de un transductor apropiado, el proceso variable se convierte en una señal eléctrica (c.c. o c.a.). Esta señal se compara con una referencia y la diferencia (error) se aplica a un amplificador. La señal del error amplificada gobierna a un dispositivo corrector, tal como un servomotor. Por medio de conexiones mecánicas, el servomotor balancea el

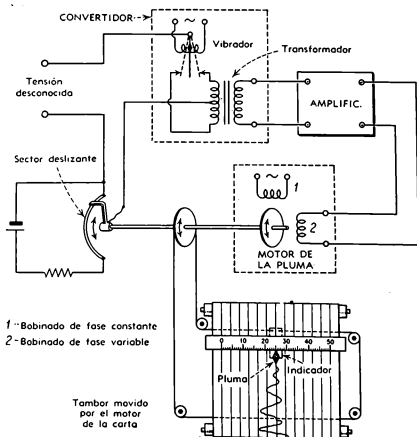


Fig. 11-2. Registrador potenciométrico. (Daystrom Inc., Weston Instruments Division.)

círculo. En la figura 11-2 se muestra un sistema típico. La tensión desconocida (en este caso c.c.) se aplica en serie y en oposición con respecto a una tensión derivada de un sector deslizante conectado a una pila patrón. La diferencia de tensión se aplica a un vibrador y se convierte en una señal del error de c.a. Esta señal, después de ser amplificada se aplica al campo

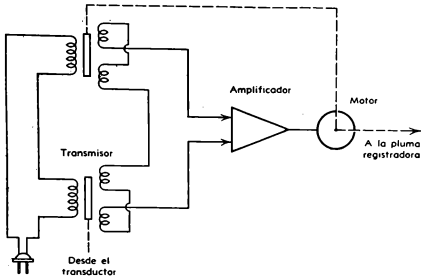


FIG. 11-3. Registrador que emplea transformadores diferenciales

de control de un servomotor bifásico. El servomotor varía la posición del sector deslizante para reducir a cero la señal del error. Por medio de un alambre que trabaja por unas poleas, el servomotor mueve a su vez la pluma registradora.

En la figura 11-3 se muestra un registrador electrónico que emplea un par de transformadores diferenciales. El transformador diferencial trabaja como *transmisor* controlado por un transductor de movimiento que varía la posición de su núcleo de acuerdo con el valor de la variable que se quiere registrar. Las salidas de los dos transformadores diferenciales se conectan en oposición. A la entrada del amplificador aparece una señal del error cuya magnitud y fase vienen determinadas por la posición relativa de los dos núcleos. El servomotor cambia la posición del núcleo al cual está acoplado mecánicamente. Cuando este núcleo alcanza la posición correspondiente a la del núcleo transmisor, la señal del error es cero y el motor se para. El motor mueve a su vez la pluma registradora.

## 11 - 2. Registro de presión

*Exactel Instrument Co.* ha desarrollado un instrumento para la medida de presión combinando un manómetro de líquido de precisión y un servomecanismo. El principio en que se basa su funcionamiento se ilustra en la figura 11-4. Un flotador, colocado en posición por la columna de mercurio

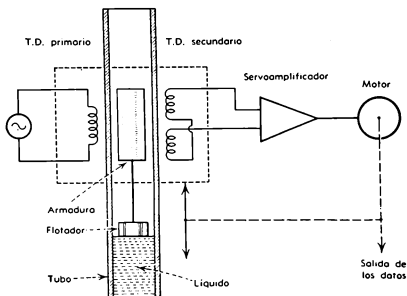


FIG. 11-4. Servomecanismo para medida de la presión. (Exactel Instrument Co.)

de un tubo de manómetro, está acoplado a la armadura (núcleo) de un transformador diferencial. Cuando la armadura está centrada con respecto a los dos bobinados secundarios del transformador diferencial, la tensión del secundario es nula, ya que los dos bobinados secundarios están conectados en serie y en oposición, y por tanto no hay señal de entrada aplicada al servoamplificador. En estas condiciones, el servomotor no se mueve. Sin embargo, cuando varía la presión, la altura de la columna de mercurio varía y la armadura se mueve de su posición central. Como ahora ya no son iguales las tensiones inducidas en los dos bobinados secundarios, aparece una diferencia de potencial a la entrada del servoamplificador; la fase de esta señal del error depende del sentido en que se haya desplazada la armadura (arriba o abajo). En un caso, la señal del error estará en fase ya no son iguales las tensiones inducidas en los dos bobinados secundarios, aparece una diferencia de potencial a la entrada del servoamplificador; la fase de esta señal del error depende del sentido en que se haya desplazada la armadura (arriba o abajo). En un caso, la señal del error estará en fase con la excitación aplicada al bobinado primario; en el otro caso, la señal del error estará 180° desfasada con respecto a la excitación. La señal del error amplificada gobierna al servomotor en el sentido determinado por el de movimiento de



la armadura. El servomotor sube o baja la caja donde se encierra el transformador diferencial hasta que los secundarios se balanceen, es decir, hasta que la armadura esté de nuevo centrada con respecto a los dos secundarios. En este momento se anula la tensión del secundario, es decir, no hay entrada en el servoamplificador, y el motor se para. Así, pues, la posición del eje del servomotor es una indicación o medida de la presión representada por la altura de la columna de mercurio. Un contador numérico mecánico (similar al contador de kilómetros de un automóvil) puede acoplarse al eje del servomotor para proporcionar una indicación numérica del valor de la presión. Cuando se desee una indicación a *distancia* se puede acoplar al eje del motor un sincrotransmisor. Un sincrorreceptor colocado a distancia mueve a un contador numérico mecánico que indica la presión. Se dispone de varios accesorios para usar con este instrumento: (1) Un dispositivo compensador automático de temperatura, que proporciona una señal de corrección al servoamplificador, de modo que la lectura de presión no sea afectada por las variaciones de la temperatura. (2) Un tubo de manómetro de acero inoxidable para medidas de muy alta presión y que aumenta el margen de medidas y de seguridad. (3) Flotadores para líquidos distintos del mercurio. (4) Dispositivos de comprobación y calibración. (5) Convertidores analógicos en digitales y otros.

### 11 - 3. Medida de pesos

La medida del peso de equipos pesados, tales como vagones de ferrocarril, camiones cargados, maquinaria industrial, etc., se realiza normalmente por medio de células de carga. Una célula de carga contiene una o más columnas de acero que soportan el peso que se trata de medir. Al estar sometidas a una carga, las columnas de acero sufren una compresión y su longitud se acorta ligeramente. El problema que se presenta es la medida de la variación de longitud que experimenta la columna. Para ello se aplican a la columna una o más bandas extensiométricas, de forma que los hilos conductores de unas se estrechen y los de otras se alarguen. Cuando el hilo conductor de una banda extensiométrica se comprime, se reduce su longitud y aumenta su espesor, con lo cual su resistencia eléctrica disminuye. Cuando el hilo conductor se alarga, aumenta su longitud y disminuye su sección, con lo cual su resistencia eléctrica aumenta. Las bandas extensiométricas se conectan en circuito puente. Las células de carga pueden colocarse bajo plataformas o pueden conectarse al cable que se usa para levantar el peso que quiere medirse. En cualquiera de los casos, el puente formado por las bandas extensiométricas se desequilibra y proporciona una señal de salida.

Como se indica en la figura 11-5, el puente está excitado por una fuente de c.a. La salida del puente es una onda senoidal cuya amplitud representa el peso que se trata de medir. La salida del puente se anula por medio de una onda senoidal de fase opuesta, derivada del potenciómetro de equilibrio. En el caso que no exista un equilibrio perfecto, aparece una diferencia de

potencial a la entrada del amplificador. Como consecuencia de esto, el servomotor gira y arrastra al potenciómetro de equilibrio. Cuando el cursor del potenciómetro alcanza el punto en el cual la tensión anula exactamente la

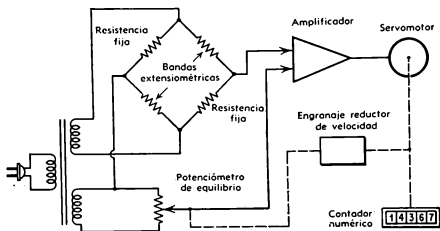


FIG. 11-5. Sistema de peso electrónico

salida del puente, la señal del error es cero y el motor se para. El motor está acoplado mecánicamente al contador numérico para indicar el peso, o a una aguja que se desplaza sobre una escala graduada.

#### 11 - 4. Voltímetro tipo servo

En la figura 11-6 se muestra un voltímetro que indica su lectura por medio de un contador numérico. De esta forma resulta más fácil realizar la lectura que en un indicador normal de escala y aguja y se evita el error de paralaje.

En la figura 11-6 se muestra cómo un vibrador recibe una muestra de la tensión que va a medirse y de la tensión del cursor del potenciómetro de equilibrio. De esta forma, la señal a la salida del vibrador consiste en una señal del error en forma de onda cuadrada cuya amplitud corresponde a la diferencia entre estas dos tensiones. Esta señal del error se amplifica y se aplica al servomotor. El motor está acoplado a un contador numérico mecánico y al eje del potenciómetro de equilibrio. Cuando el cursor del potenciómetro de equilibrio alcanza el punto en el cual su tensión es igual a la tensión del contacto del interruptor de márgenes, la señal del error es cero y el motor se para. El contador numérico mecánico muestra el valor de la tensión que hay aplicada a las puntas de prueba.

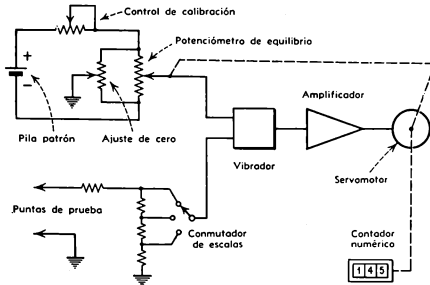


FIG. 11-6. Voltímetro tipo servo

### 11 - 5. Servo con acoplamiento magnético

En la técnica del servomecanismo básico puede introducirse una variación haciendo que el motor gire continuamente. El motor se acopla a la carga por medio de un par de acoplamientos magnéticos, los cuales quedan sin excitación cuando la señal del error es cero. Cuando existe un error, uno de los acoplamientos o el otro queda excitado, y de esta forma se transmite el par a la carga. El sentido del error determina cuál de los dos acoplainientos se excita, con lo cual queda determinado el sentido en que la carga debe

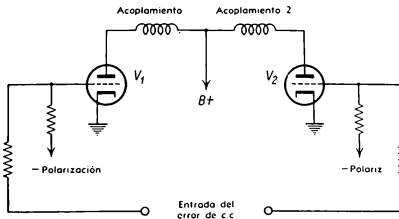


FIG. 11-7. Circuito básico para acoplamiento magnético

moverse. En cualquiera de los casos la carga se mueve en el sentido requerido para anular la señal del error.

El acoplamiento magnético consiste en dos placas circulares encerradas en un recipiente que contiene aceite con partículas de material magnético en suspensión. Una de las placas está acoplada al eje del motor y la otra está acoplada a la carga. Cuando se permite circular corriente por la bobina del

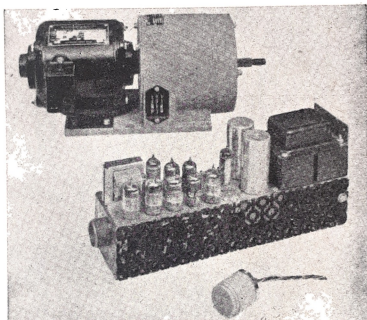


FIG. 11-8. Servomecanismo para aplicaciones de movimiento a distancia. (Lear, Inc.)

acoplamiento magnético, el polvo magnético se solidifica y proporciona un enlace rígido entre las dos placas. De esta forma, el movimiento giratorio del eje del motor se transmite a la carga. Cuando no hay corriente en las bobinas, el polvo magnético queda *suelto*. La placa unida al eje del motor continúa girando pero el movimiento no se transmite a la carga.

En la figura 11-7 se muestra un circuito básico de un acoplamiento. Las bobinas de los dos acoplamientos están conectadas a los circuitos de placa de dos válvulas, de modo tal que uno de los acoplamientos, o el otro, se excitará cuando la tensión del error de c.c. se aplique al circuito. Cuando la tensión del error es de tal polaridad que hace positiva la reja de la válvula  $V_1$ , se excitará el acoplamiento 1, y el motor arrastrará la carga. Cuando la tensión del error sea de polaridad opuesta; se excitará el acoplamiento 2, y la carga será arrastrada por el motor en dirección contraria.

En la figura 11-8 se muestra un servomecanismo típico de acoplamiento

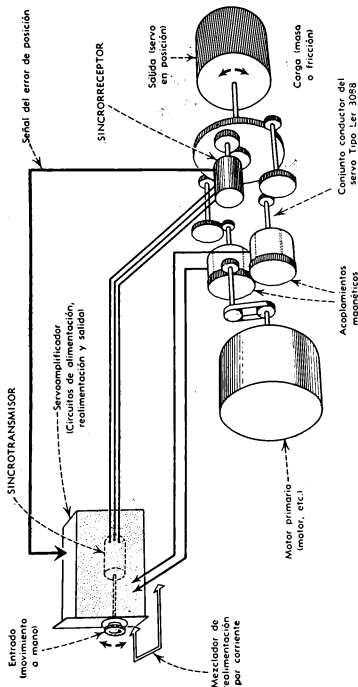


FIG. 11-9. Diagrama de funcionamiento de un servo del tipo de acoplamiento magnético. (Lear, Inc.)

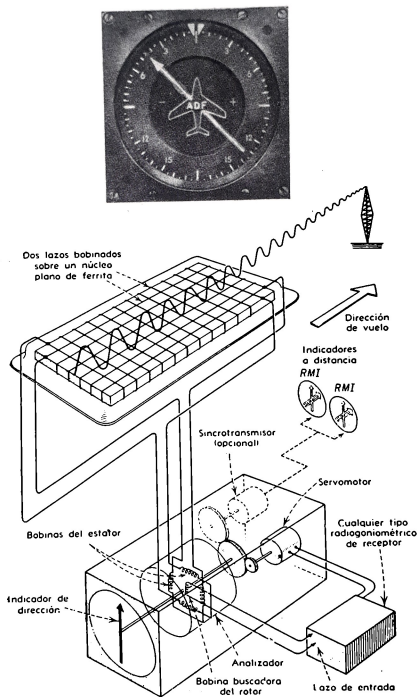


FIG. 11-10. Radiogoniómetro automático. (Lear, Inc.)

magnético para aplicaciones de movimiento a distancia. En la parte superior se muestra el motor y el acoplamiento magnético y en la parte inferior aparece el amplificador. En la figura 11-9 se muestra un diagrama de funcionamiento de este sistema. El eje de salida sigue el movimiento del control manual con una velocidad y exactitud excepcionales. El sistema alcanza la velocidad máxima en un quinceavo de segundo y su exactitud está dentro de un cuarto de grado.

## 11 - 6. Radiogoniómetro

Los dispositivos de navegación, control automático de vuelo y dirección de cohetes emplean frecuentemente las técnicas de los servomecanismos. En la figura 11-10 se muestra, por ejemplo, un radiogoniómetro automático. El indicador de este instrumento muestra la dirección de vuelo del avión en que ha sido instalado, con respecto a la estación de radio que se ha sintonizado. Por medio de esta información el piloto conduce el avión a su destino.

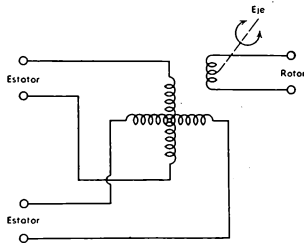


FIG. 11-11. El analizador

Las dos antenas de lazo están bobinadas formando ángulo recto a cada lado de un núcleo plano de ferrita. Estos lazos están conectados a las dos bobinas del estator de un *analizador*. El analizador, que tiene la apariencia de un síncrono, se muestra esquemáticamente en la figura 11-11. Las dos bobinas del estator funcionan como primarios de un transformador e inducen tensión en el rotor, que actúa como un secundario. Como se indica en la figura, las dos bobinas del estator están situadas en ángulo recto. Uno de los estatores induce en el rotor una tensión proporcional al seno del ángulo girado por el eje del analizador y el otro estator induce una tensión proporcional

al coseno de dicho ángulo. La tensión resultante inducida en el rotor es la suma vectorial de las dos tensiones que hay a la entrada del estator.

En la figura 11-10, las dos tensiones que aparecen en las antenas de lazo tienen una amplitud proporcional a la orientación que el avión tenga con respecto a la estación transmisora. Estas dos señales se aplican a los bobinados del estator del analizador. La tensión inducida en el rotor es, por tanto, función de la dirección de vuelo con respecto a la situación del transmisor. La tensión del rotor se aplica como señal del error al receptor y la salida del receptor se aplica al servomotor. Por medio de un reductor de velocidad de engranajes, el motor está conectado mecánicamente al eje del analizador, así como a la aguja del indicador. Cuando el rotor del indicador alcanza la posición en la cual las tensiones inducidas en él por las dos bobinas del estator son iguales y opuestas, la señal del error es cero. El servomotor deja de girar, y el indicador señala la dirección de vuelo con relación a la dirección en que se encuentra el transmisor.

Como se muestra en la figura, el servomotor está acoplado al eje de un sincrotransmisor. Este transmisor puede estar conectado con uno o más sincrorreceptores situados en otro lugar. Estos receptores moverán sus ejes, en correspondencia con la posición del eje del sincrotransmisor. Las agujas unidas a los ejes de los receptores repetirán la lectura del indicador principal. De esta forma, los indicadores de radio magnéticos (*RMI*) pueden instalarse en cualquier lugar del avión.

## 11 - 7. Control automático de vuelo

Los sistemas de control automático de vuelo, tanto para aviones como para cohetes, son servomecanismos de posición en los cuales la carga es el propio avión o cohete. Estos servos de posición dirigen al avión o al cohete hacia un objetivo determinado. Las señales de entrada para el mando de

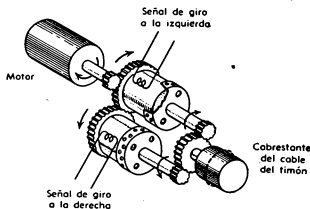


FIG. 11-12. Control del timón. (Lear, Inc.)



estos servomecanismos se obtienen de señales de radio o de radar por medio de calculadores, o de transductores tales como células de seguimiento de estrellas, elementos sensibles al calor, giróscopos sensibles a la altitud o dispositivos sensibles a la aceleración. En cualquier caso, la señal del error debe

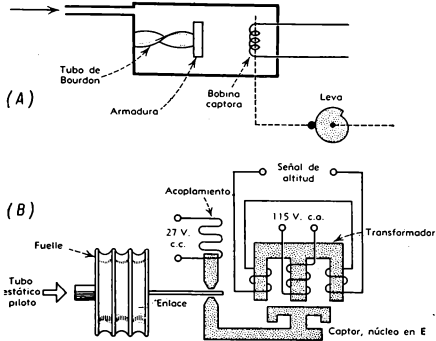


FIG. 11-13. Dispositivo sensible a la altitud. (A - Servomechanisms Inc.; B - Sperry Gyroscope Co.)

controlar un dispositivo corrector del error para corregir las desviaciones del rumbo de vuelo deseado. El sistema corrector puede ser eléctrico, neumático o hidráulico, o una combinación de estos tipos.

En la figura 11-12 se muestra un corrector con sus componentes para el sistema de control del timón de un avión. El motor gira continuamente y el par se transmite al cable de cabrestante del timón por medio de un acoplamiento magnético de polvo de hierro. En este sistema, un giróscopo detecta las desviaciones con respecto a un rumbo determinado y proporciona la señal del error correspondiente. El amplificador del error excita el acoplamiento de giro a la derecha o el de giro a la izquierda, llevando el timón a la posición para volver al avión al rumbo correcto.

Algunos sistemas de control de vuelo automático emplean un control de altitud para mantener una altura de vuelo fija, o para usarlo en unión del instrumento del equipo de aterrizaje. En la figura 11-13 se muestran dos téc-

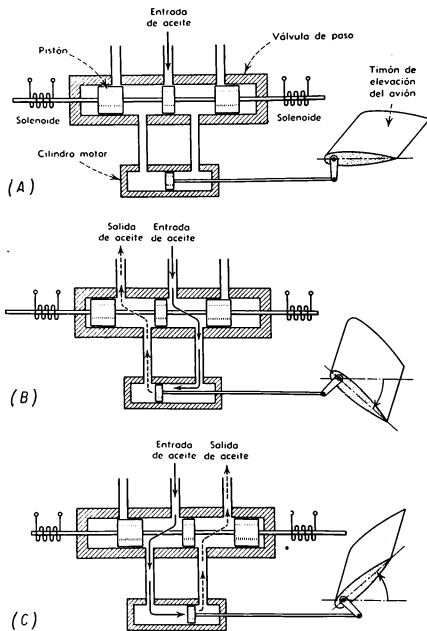


FIG. 11-14. Sistema de control hidráulico

nicas de dispositivos sensibles a los cambios de altitud. En la figura 11-13 (A), un tubo de Bourdon en espiral responde a los cambios de presión del aire que se producen al variar la altitud. El tubo de Bourdon controla la posición de una armadura (núcleo) con respecto a un elemento inductivo captor. Este elemento, que es un transformador diferencial del tipo *E*, proporciona una señal de salida (error) a un amplificador del error. Unos acoplamientos magnéticos, que responden a la señal del error, varían la posición de los timones de elevación del avión para mantener la altitud deseada.

En la figura 11-13 (B), un fuelle compensado por un resorte interior responde a las variaciones de presión del aire debida a los cambios de altitud. El movimiento del fuelle se transmite a la armadura de un transformador tipo *E*. Los secundarios de este transformador, conectados en serie y en oposición, proporcionan una señal del error dependiente de la altitud.

Como se indica en la figura 11-13 (B), se emplea un acoplamiento magnético para establecer la ligazón entre el fuelle y la armadura del transformador tipo *E*. Cuando el acoplamiento no está excitado, la armadura del transformador se mantiene en su posición central. Como consecuencia de ello, la señal del error será cero a la altitud a la cual se conecte el control de altitud.

## 11 - 8. Control neumático e hidráulico

En los sistemas de dirección automáticos se emplean extensamente los correctores del error electrohidráulicos. La técnica en que se basan estos correctores se ilustra en la figura 11-14. En este caso, la posición del pistón de la válvula de paso se controla por medio de un par de solenoides. Cuando el error del sistema es cero, ambos solenoides están sin excitación y la válvula está *cerrada*. Este proceso se ilustra en la figura 11-14 (A). El pistón central cierra la entrada, de forma que el aceite no puede penetrar en la válvula de paso.

Si se excita el solenoide de la izquierda (en respuesta a una señal del error) el pistón se desplaza hacia la izquierda, como se muestra en la figura 11-14 (B). El aceite, a presión, es forzado a través de la válvula de paso, en la dirección que indican la flechas de trazo continuo. El aceite que penetra en la parte derecha del cilindro motor fuerza al pistón hacia la izquierda. Como consecuencia de esto, el aceite que se encuentra en la parte izquierda del cilindro es forzado a volver por la tubería, como se indica por las flechas de trazos. El pistón del cilindro está unido mecánicamente a los timones del avión o del cohete, para corregir la altura de vuelo. La señal del error se anula, el solenoide queda sin excitación y un muelle lleva el pistón de la válvula a la posición central.

Si el error hubiese sido en el sentido opuesto, se habría excitado el solenoide de la derecha. El pistón de la válvula de paso se habría movido hacia la derecha, como se muestra en la figura 11-14 (C). El aceite sería forzado a través de la válvula de paso hacia el lado izquierda del cilindro

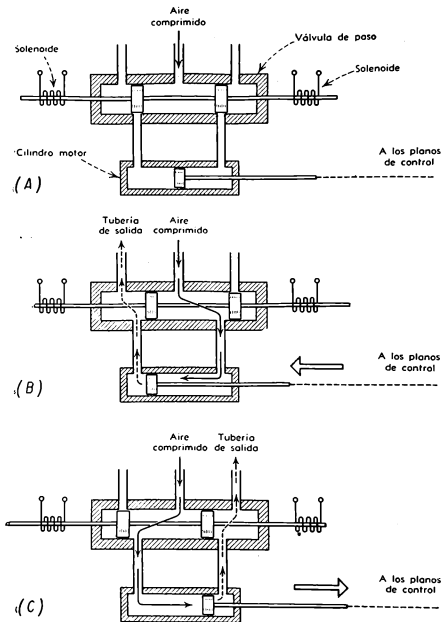


FIG. 11-15. Sistema de control neumático

motor, como se muestra por las flechas de trazo continuo. El pistón del cilindro motor se movería hacia la derecha, y el aceite de la parte derecha del cilindro se vería forzado a volver a la tubería de salida, como se indica por las flechas de trazos.

En lugar de aceite puede emplearse aire comprimido para mover el pistón del cilindro motor. En la figura 11-15 se muestra un sistema *neumático* de este tipo. Como en el caso de la válvula de paso hidráulica, un par de solenoides permite mover el pistón de la válvula en ambos sentidos (según sea el sentido del error del sistema). El aire comprimido penetra en el cilindro motor y mueve al pistón. Este movimiento se transmite a los planos de control para corregir la altura de vuelo.

En los párrafos anteriores se ha hecho referencia a los planos de control de un avión o de un cohete. Tales planos incluyen timones de elevación de dirección y alerones, los cuales al actuar en contra del aire en movimiento alteran la altitud del avión. Sin embargo, fuera de la atmósfera, este tipo de control no puede actuar. La dirección y altitud de los cohetes se controla por otros medios, tales como (1) placas deflectoras que pueden variarse de posición en el chorro de salida de los gases, y (2) motores montados en suspensión que pueden situarse de forma que cambien la dirección del empuje. Los sistemas de control son básicamente similares a los descritos anteriormente y se emplean para colocar en posición las placas de deflexión o la suspensión de los motores.

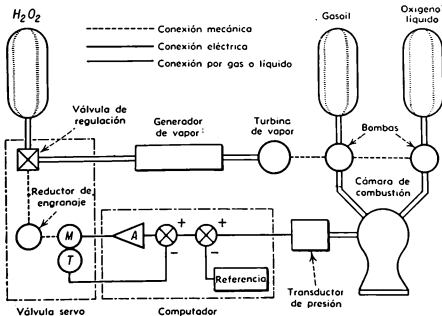


FIG. 11-16. Control de empuje para cohetes. (Servomechanisms Inc.)

### 11 - 9. Control de empuje para cohetes

El sistema de control que se muestra en la figura 11-16 mantiene el nivel de empuje en un motor de cohete de combustible líquido a un valor determinado. El gasoil y el oxígeno líquido se envían a la cámara de combustión por medio de un par de bombas movidas por una turbina de vapor. Una válvula servo controla la llegada de peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) al generador de vapor y determina de esta forma el número de revoluciones por minuto de las bombas.

La presión en la cámara de combustión activa a un transductor, cuya salida se compara con una señal de referencia. La señal del error se amplifica y se aplica a un servomotor de dos fases. Por medio de un reductor de engranajes el motor ajusta la válvula para restaurar la presión en la cámara de combustión al valor correcto. Un tacómetro conectado al eje del servomotor proporciona realimentación para establecer un control proporcional a la velocidad de salida.

### 11 - 10. Servo computadores

Los servomecanismos se emplean frecuentemente en los computadores analógicos y en los conversores de analógico en digital. En la figura 11-17 se muestra un ejemplo. El servo *multiplicador* recibe dos tensiones de entrada

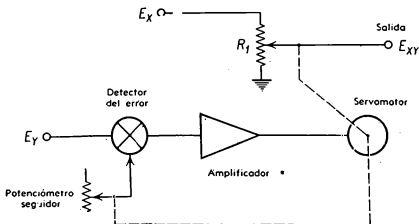


FIG. 11-17. Servo multiplicador

( $E_X$  y  $E_Y$ ) y proporciona una tensión de salida ( $E_{XY}$ ) proporcional al producto  $E_X \times E_Y$ . La tensión  $E_Y$  es la entrada de mando del servomecanismo. El servomotor gira hasta que la tensión del potenciometro seguidor coincide

con la tensión  $E_y$ . El potenciómetro  $R_1$  es movido también por el servomotor y su cursor alcanza una posición determinada por  $E_y$ .

El valor de la tensión que aparece en el cursor de  $R_1$  depende de: (1) la magnitud de la tensión  $E_x$ , y (2) de la posición del cursor. Como este cursor tiene una posición que depende de  $E_y$ , la tensión de salida representa el producto de las dos tensiones de entrada.

Un servo de *velocidad* difiere de un servo de *posición* en que la tensión de mando de entrada determina la velocidad en vez de la posición del eje de salida. En este tipo de servo, el detector del error compara la señal de

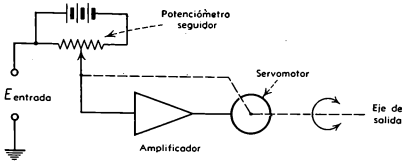


FIG. 11-18. Servo para convertir niveles de tensión en posición de un eje

mando de entrada con una tensión que representa la velocidad de salida. Un tacómetro generador conectado al eje del servomotor proporciona una tensión dependiente de la velocidad al detector del error. Una tensión de mando de una magnitud determinada hace que el motor gire a una velocidad correspondiente.

El servo de velocidad puede realizar la operación matemática de integración. Como consecuencia de que el recorrido total del eje de salida depende de (1) la magnitud de la tensión de mando de entrada y (2) del tiempo que esta tensión esté aplicada, la salida del servo representa la integral con respecto al tiempo de la señal de entrada.

En un computador analógico los datos están representados por niveles de tensión o por ángulos girados por un eje. Un valor numérico determinado, por ejemplo, puede estar representado por una tensión de un valor correspondiente o por un eje giratorio situado en un ángulo determinado. A veces es conveniente convertir los datos en niveles de tensión, en datos representados por posición de un eje. En la figura 11-18 se representa un servomecanismo que realiza esta conversión. La tensión de entrada puede convertirse en un ángulo girado por el eje equilibrándola con la tensión de un potenciómetro seguidor. Si estas dos tensiones no coinciden aparece una señal de error a la entrada del amplificador. El servomotor ajusta la posición del potenciómetro seguidor para establecer la condición de equilibrio. El desplazamiento angular del eje de salida representa, por tanto, la magnitud de la tensión de entrada.

En los sistemas digitales los datos se representan por dispositivos biestables (conduciendo o al corte). La información que se maneja en un sistema digital es por conversión procedente de su forma analógica (nivel de tensión o ángulo girado por un eje). Esta conversión puede llevarse a cabo conectando un disco codificador al eje del servo de la figura 11-18. En la figura 11-19 se muestra un disco de este tipo. Como se indica en la figura,

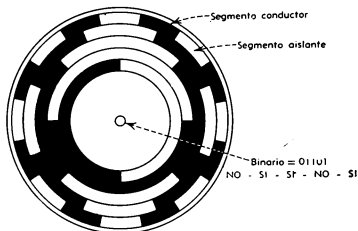


FIG. 11-19. Disco codificador

el disco tiene una serie de anillos concéntricos con segmentos conductores y aislantes. El contacto eléctrico con el disco se establece por medio de un conjunto de escobillas, una por anillo. De acuerdo con el desplazamiento angular del disco, unas escobillas descansan sobre segmentos conductores y otras sobre segmentos aislantes. Las escobillas que hacen contacto con segmentos conductores corresponden a interruptores cerrados y las que corresponden con segmentos aislantes representan interruptores abiertos. El dato representado por el ángulo girado por el eje se convierte en un dato binario (conduciendo o al corte) que puede emplearse en un computador digital. Algunos discos codificadores emplean segmentos transparentes y opacos en vez de segmentos conductores y aislantes. Estos discos emplean haces luminosos y células fotoeléctricas en lugar de escobillas.

## SUMARIO

Los servomecanismos se emplean en la industria para control y registro de funciones variables. Por medio de un transductor apropiado (por termoelectrónico, fuelles controlados, transformadores diferenciales, etc.) las funciones variables, tales como temperatura o presión, se convierten en señales eléctricas.



Estas señales se comparan con una señal de mando de referencia y la tensión diferencia (error) se aplica al servoamplificador. El servomotor arrastra una pluma registradora y también puede controlar válvulas, bombas, etc.

A veces se emplean acoplamientos magnéticos para evitar el tener que parar y arrancar el servomotor. En este tipo de servomecanismo el motor gira continuamente y el par se transmite a la carga por medio de dos acoplamientos magnéticos. Cuando se excita uno de los acoplamientos, la carga se mueve en un sentido, y cuando se excita el otro, la carga se mueve en sentido contrario. Cuando el error del servo es cero, los dos acoplamientos están sin excitación y la carga permanece estacionaria. El acoplamiento magnético consiste en dos discos que giran en el seno de aceite con una suspensión de polvos de hierro. Uno de los discos es arrastrado por el motor y el otro está conectado a la carga. Cuando la bobina del acoplamiento se excita el aceite se hace más compacto y proporciona un acoplamiento mecánico entre los dos discos.

Los servomecanismos se emplean en el control de vuelo de aviones y cohetes. En los indicadores radiomagnéticos la señal de error se obtiene de una señal de radio que se recibe. El servomotor controla una aguja que señala la dirección del transmisor de radio con respecto al rumbo del avión. Los servomecanismos que responden a las variaciones de la presión del aire se emplean como indicadores de altitud y sistemas de control.

Los mecanismos neumáticos e hidráulicos se emplean normalmente en los sistemas de control automático de vuelo. Estos dispositivos responden a los errores del servo y mueven planos de control de vuelo, placas deflectoras, motores de cohetes, etc., etc.

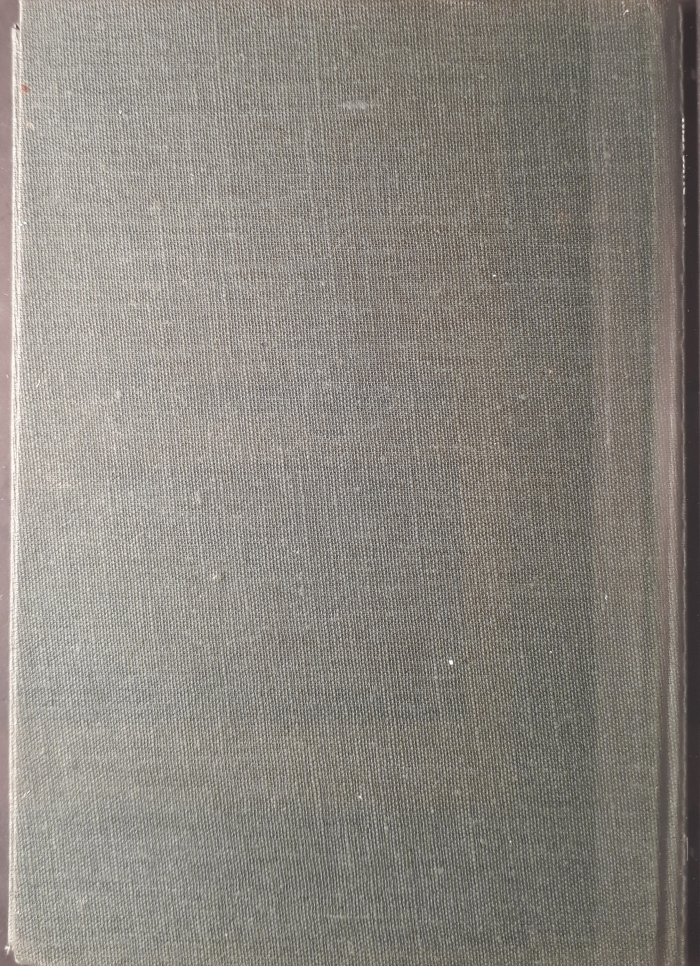
### PREGUNTAS

1. Describir un transductor que produzca movimiento y que pueda emplearse para llevar a posición el núcleo del transmisor de la figura 11-3.
2. Describir la construcción y el objeto de una célula de carga.
3. Explicar cómo puede añadirse un control de *calibración* al circuito de la figura 11-5.
4. Explicar cómo puede añadirse un control de *cero* al circuito de la figura 11-5.
5. Describir varios métodos para evitar el sobreimpulso y la oscilación en el circuito de la figura 11-6.
6. Con relación a la figura 11-6, ¿qué modificaciones son necesarias para permitir la medida de la tensión de c.a. y de c.c.?
7. Describir la construcción y explicar el funcionamiento de un analizador.
8. ¿Cuál es el objeto de una válvula de paso hidráulica?

9. ¿Cuál es el objeto de un cilindro motor hidráulico?
10. ¿Cuál es la ventaja del sistema hidráulico de la figura 11-14 comparado con el empleo de solenoides para llevar a posición los planos de control directamente?
11. ¿Cuál es la diferencia entre sistema *hidráulico* y sistema *neumático*?
12. Hacer un esquema y explicar el funcionamiento de un sistema de control que reduzca el empuje de un cohete cuando aumente la altitud.

1966

**H. A. S. A.** EDITORIAL HISPANO AMERICANA, S. A.



OTRAS OBRAS TECNICAS  
PUBLICADAS POR ESTA EDITORIAL

*Ing. Francisco L. Singer*

TRATADO DE INSTALACIONES  
ELECTRICAS

RADIO SERVICE INTEGRAL

TRANSFORMADORES

EL LABORATORIO DE RADIO Y TV

TRATADO DE TELEVISION

MANUAL DEL INGENIERO  
ELECTRICISTA

TRATADO DE BOBINADOS  
ELECTROMECHANICA PRACTICA

*Wostrel y Praetz*

MANUAL DE REFRIGERACION  
ELECTRICA

*Joseph Stiles Beggs*

MECANISMOS

*Eugene M. Grabbe*

AUTOMACION  
EN LA INDUSTRIA Y EL COMERCIO

*Pender del Mar*

MANUAL DEL INGENIERO  
ELECTRICISTA

*C. Morgan Jones*

MANUAL TECNICO DIESEL

*Douglas C. Greenwood*

MANUAL DE SOLUCIONES  
INDUSTRIALES

*Jesse Seymour Doolittle*

EL LABORATORIO DEL INGENIERO  
MECANICO

---

EDITORIAL HISPANO AMERICANA S. A.

Alsina 731

Buenos Aires



**EDITORIAL HISPANO AMERICANA S. A.**